



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO**  
**CENTRO TECNOLÓGICO**  
**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA AMBIENTAL**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AMBIENTAL**

**EMILIA BRITO**

**ESTIMATIVA DA PRODUÇÃO DE SEDIMENTOS DA BACIA DO RIO SANTA  
MARIA DA VITÓRIA – ESPÍRITO SANTO ATRAVÉS DO MODELO  
MATEMÁTICO *SOIL AND WATER ASSESSMENT TOOL* (SWAT)**

**VITÓRIA, ES**

**2015**

EMILIA BRITO

**ESTIMATIVA DA PRODUÇÃO DE SEDIMENTOS DA BACIA DO RIO SANTA  
MARIA DA VITÓRIA – ESPÍRITO SANTO ATRAVÉS DO MODELO  
MATEMÁTICO *SOIL AND WATER ASSESSMENT TOOL* (SWAT)**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para a obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Ambiental, na área de concentração de Recursos Hídricos.

Prof. Orientador: Dr. Daniel Rigo

**VITÓRIA, ES  
2015**

**ESTIMATIVA DA PRODUÇÃO DE SEDIMENTOS DA BACIA DO RIO SANTA  
MARIA DA VITÓRIA – ESPÍRITO SANTO ATRAVÉS DO MODELO  
MATEMÁTICO *SOIL AND WATER ASSESSMENT TOOL* (SWAT)**

Dissertação de Mestrado apresentado ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Ambiental, na área de concentração de Recursos Hídricos.

Aprovada em 02/Março/2015

**COMISSÃO EXAMINADORA**

---

Prof. Dr. Daniel Rigo

Universidade Federal do Espírito Santo

Orientador

---

Prof. Dr. José Antônio Tosta Reis

Universidade Federal do Espírito Santo

Examinador Interno

---

Celso Augusto Guimarães Santos

Universidade Federal da Paraíba

Examinador Externo

Dados Internacionais de Catalogação-na-publicação (CIP)  
(Biblioteca Setorial Tecnológica,  
Universidade Federal do Espírito Santo, ES, Brasil)

---

B862e Brito, Emilia, 1986-  
Estimativa da produção de sedimentos da Bacia do Rio  
Santa Maria da Vitória – Espírito Santo através do modelo  
matemático *Soil and Water Assessment Tool* (SWAT) / Emilia  
Brito. – 2015.  
97 f. : il.

Orientador: Daniel Rigo.  
Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) –  
Universidade Federal do Espírito Santo, Centro Tecnológico.

1. Bacias hidrográficas. 2. Hidrologia – Modelos. 3. Modelos  
matemáticos. 4. Sedimentos fluviais. 5. Santa Maria da Vitória,  
Rio, Bacia (ES). 6. Vazão fluvial. I. Rigo, Daniel. II. Universidade  
Federal do Espírito Santo. Centro Tecnológico. III. Título.

CDU: 628

---

*A minha pequena Manu  
e ao meu grande Lu.*

## **AGRADECIMENTOS**

Ao Professor e Orientador Daniel Rigo, pela oportunidade, serenidade e todo o conhecimento repartido durante o desenvolver do trabalho. Obrigado por toda a compreensão.

A toda equipe do PPGEA, assim como o corpo discente. Obrigado pelo conhecimento dividido e oportunidade de crescimento profissional.

Aos professores examinadores Celso Augusto Guimarães Santos e José Antônio Tosta Reis, pela disponibilidade em contribuir para a melhoria deste projeto.

A todos do GEARH, pelo apoio, conversas e auxílio. Em especial a Mônica, por todas as dúvidas sanadas e ideias dadas.

Às colegas Rafaeli Brune e Andriellem Soares, por dividirem a sala de estudos comigo e conversas.

Ao colega Fillipe Tesch, companheiro de modelagem e descobertas no mundo hidrossedimentológico.

Ao meu esposo Luciano, por me auxiliar nas atividades de casa e por cuidar da Manoela para que eu pudesse estudar nos finais de semana.

A minha família, pelo apoio incondicional e por me fornecer a base para tudo que sempre precisei.

Aos amigos, que compreenderam a minha falta nos aniversários, festas, viagens e happy hours.

Aos companheiros de trabalho, pelo apoio e incentivo.

A todos que me auxiliaram, com um sorriso ou um papo fiado nos breaks, muito grata!

## RESUMO

Com o objetivo de estimar a produção de água e sedimentos para a Bacia do rio Santa Maria da Vitória, este trabalho utilizou como ferramenta o modelo matemático *Soil and Water Assessment Tool* (SWAT), inserindo no programa dados peculiares a esta bacia hidrográfica, tais como o Modelo Numérico do Terreno (MNT), os tipos e usos do solo e dados climatológicos. Os resultados da modelagem para o período analisado foram comparados com dados monitorados, e através da análise de sensibilidade dos parâmetros modelados, identificou-se aqueles que mais influenciavam os resultados, que por sua vez foram calibrados através do programa SWAT-CUP. Uma vez calibrado, o programa foi novamente testado e sua eficácia foi avaliada estatisticamente com o Coeficiente de Eficiência de Nash-Sutcliffe (COE), Tendência Percentual (PBIAS), Erro Quadrado Médio (EQM) e o Coeficiente de Determinação ( $R^2$ ). Observado que a bacia em questão possui dois reservatórios, a calibração foi realizada para duas sub-bacias: uma a jusante e outra a montante destes. Os dados da modelagem à montante tiveram melhores resultados que a jusante, embora ambos ilustrem bem a tendência da bacia para produção de água e sedimentos.

Palavras-chave: bacia hidrográfica, SWAT, vazão e produção de sedimentos.

## **ABSTRACT**

In order to measure the flow and sediment yield to the basin of the river Santa Maria da Vitoria this study used the mathematical model Soil and Water Assessments Tools (SWAT) entering the program peculiar data to this river basin, such as the Numerical Model (DEM) types and land uses and climate data. The result of modeling for the analyzed period were compared to monitored data, and through the modeled parameters sensitivity analysis was identified those who most influenced the results, which in turn have been calibrated by SWAT-CUP program. Calibrated, the program was retested and its effectiveness was statistically evaluated with the efficiency coefficient of Nash-Sutcliffe (COE), Trend Percentage (PBIAS), Mean Square Error (MSE) and the coefficient of determination ( $R^2$ ). Observed that the basin in question has different slopes and two reservoirs, the calibration was performed for two sub-basins: one downstream and the other upstream of the reservoir. The modeling results have upstream to downstream best results, although both and illustrating the tendency of the basin for the yield of water and sediments.

Key-words: watershed, SWAT, flow and yield sediment.



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Sequência dos dados de entrada e a visualização dos dados de saída do SWAT.....	17
Figura 2. Bacia do Rio Santa Maria da Vitória (em destaque).....	28
Figura 3. Localização dos Reservatórios de Rio Bonito e Suiça. ....	30
Figura 4. Modelo Numérico do Terreno para a Bacia Hidrográfica do Santa Maria da Vitória truncada. ....	32
Figura 5. Uso e Ocupação do Solo para a Bacia truncada do Santa Maria da Vitória. ....	33
Figura 6. Mapa de Solos para a Bacia truncada do Santa Maria da Vitória. ....	35
Figura 7. Sub-bacias e Rede de drenagem geradas pelo “ <i>Automatic Watershed Delineation</i> ”. ....	41
Figura 8. Bacia do Rio Santa Maria da Vitória truncada, com sub-bacias, exutórios e reservatório. ....	48
Figura 9. Localização das sub-bacias 11 e 52. ....	49
Figura 10. Produção de Sedimentos – Descarga Sólida (ton/mês) para a Bacia truncada do Rio Santa Maria da Vitória, para o mês de março/2014. ....	54
Figura 11. Produção de Sedimentos e Classes de Uso do Solo nas sub-bacias. Em destaque: Bacias com alta produção de sedimentos. ....	57

## LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1. Área (percentuais) para o Uso e Ocupação do Solo da Bacia truncada do Santa Maria da Vitória. ....	34
Gráfico 2. Vazão Simulada e Monitorada para a Sub-bacia 11 da Bacia truncada do rio Santa Maria da Vitória – a montante dos reservatórios. ....	50
Gráfico 3. Vazão Simulada e Monitorada para a Sub-bacia 52 da Bacia truncada do Rio Santa Maria da Vitória – a jusante dos reservatórios. ....	50
Gráfico 4. Vazão (Modelada e Monitorada) e Precipitação para a sub-bacia 11 da Bacia truncada do Rio Santa Maria da Vitória – a montante dos reservatórios. ....	51
Gráfico 5. Vazão (Modelada e Monitorada) e Precipitação para a sub-bacia 52 da Bacia truncada do Rio Santa Maria da Vitória – a jusante dos reservatórios. ....	51
Gráfico 6. Correlação entre vazão modelada e monitorada para a sub-bacia 11 da Bacia Truncada do Rio Santa Maria da Vitória – a montante dos reservatórios. ....	52
Gráfico 7. Correlação entre vazão modelada e monitorada para a sub-bacia 52 da Bacia Truncada do Rio Santa Maria da Vitória – a jusante dos reservatórios. ....	53
Gráfico 8. Relação entre a Descarga Sólida e a Concentração de Sólidos Suspensos Totais (SST) para a sub-bacia 52 da Bacia truncada do Rio Santa Maria da Vitória. ....	58
Gráfico 9. Concentração de Sólidos Suspensos Totais Monitorados (Rampinelli, 2013) e Modelados. ....	59
Gráfico 10. Descargas Sólidas Monitoradas (Rampinelli, 2013) e Modeladas para a sub-bacia 52 da Bacia truncada do Rio Santa Maria da Vitória. ....	60
Gráfico 11. Vazão calibrada e monitorada para a sub-bacia 11 da Bacia Truncada do Rio Santa Maria da Vitória – a montante dos reservatórios. ....	65
Gráfico 12. Vazão calibrada e monitorada para a sub-bacia 52 da Bacia Truncada do Rio Santa Maria da Vitória – a jusante dos reservatórios. ....	65
Gráfico 13. Correlação entre vazão calibrada e monitorada para a sub-bacia 11 da Bacia Truncada do Rio Santa Maria da Vitória – a montante dos reservatórios. ....	66

Gráfico 14. Correlação entre vazão calibrada e monitorada para a sub-bacia 52 da Bacia Truncada do Rio Santa Maria da Vitória – a jusante dos reservatórios. ....	67
Gráfico 15. Concentração de Sólidos Suspensos Totais Monitorados (Rampinelli, 2013) e Modelados. ....	68

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Características das Usinas Hidrelétricas de Suíça e Rio Bonito .....	30
Tabela 2. Características físicas das classes de solo .....	37
Tabela 3. Parâmetros utilizados para a análise de sensibilidade .....	43
Tabela 4. Análises Estatísticas para o Modelo Simulado – Sub-bacia 11 .....	62
Tabela 5. Análises Estatísticas para o Modelo Simulado – Sub-bacia 52 .....	62
Tabela 6. Parâmetros de Calibração para o Modelo .....	64
Tabela 7. Análises Estatísticas para o Modelo Simulado – Sub-bacia 11 .....	68
Tabela 8. Análises Estatísticas para o Modelo Simulado – Sub-bacia 52 .....	68

## LISTA DE SIGLAS

PPGEA	Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental
GEARH	Grupo de Estudos e Ações em Recursos Hídricos
SWAT	<i>Soil and Water Assessment Tools</i>
PNRH	Plano Nacional de Recursos Hídricos
SIG	Sistema de Informações Geográficas
WEPP	<i>Water Erosion Prediction Project</i>
ANSWERS	<i>Areal Non-Point Source Watershed Environmental Response Simulation</i>
KYERMO	<i>Kentucky Erosion Model</i>
EUROSEM	<i>European Soil Erosion Model</i>
CREAMS	<i>Chemincals Runoff and Erosion From Agricultural Management Systems</i>
SWRRB	<i>Simulation for Water Resources in Rural Basins</i>
ROTO	<i>Routing Output to Outlet</i>
HRU	<i>Hidrologic Response Units</i>
MUSLE	<i>Modified Universal Soil Loss Equation</i>
SCS-CN	<i>Soil Conservation Service – Curve Number</i>
SWAT-CUP	<i>Soil and Water Assessment Tools Calibration and Uncertainty Procedures</i>
GLUE	<i>Generalized Likelihood Uncertainty Fitting</i>
Parasol	<i>Parameter Solution</i>
MCMC	<i>Markov Chain Monte Carlo</i>
SUFI2	<i>Sequencial Uncertainty Fitting</i>
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
UTM	Universal Transversa de Mercator
MNT	Modelo Numérico do Terreno
LP DAAC	<i>Land Processes Distributed Active Archive Center</i>

ASTER	<i>Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer</i>
NASA	<i>National Aeronautics and Space Administration</i>
EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
INCAPER	Instituto Capixaba de Pesquisa, Assistência Técnica e Extensão Rural
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
Ha	Hectare
ANA	Agência Nacional de Águas
COE	Coeficiente de Eficiência de Nash-Sutcliffe
PBIAS	Tendência Percentual
EQM	Erro Quadrado Médio
R <sup>2</sup>	Coeficiente de Determinação
SP	São Paulo
ES	Espírito Santo
SST	Sólidos Suspensos Totais

## SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO .....	2
2. OBJETIVOS .....	5
2.1. Geral .....	5
2.2. Específicos .....	5
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	6
3.1. Erosão .....	6
3.2. Hidrossedimentação Em Bacias Hidrográficas .....	7
3.3. Modelos Hidrossedimentológicos .....	12
3.4. <i>Soil And Water Assessment Tools</i> – SWAT .....	14
3.6. SWAT-CUP .....	23
4. METODOLOGIA .....	27
4.1. Área de Estudo .....	27
4.2. Dados para a Modelagem .....	31
4.2.1. Modelo Numérico do Terreno (MNT) .....	31
4.2.2. Mapa de Uso e Ocupação Do Solo .....	33
4.2.3. Mapa de Solos .....	35
4.2.4. Dados Climatológicos .....	39
4.3. SWAT .....	39
4.4. SWAT-CUP .....	44
4.5. Análise Estatística dos Resultados .....	46
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	48
5.1. Modelagem com o SWAT sem Calibração .....	48
5.2. Modelagem Com o SWAT Calibrado .....	63
6. CONCLUSÃO .....	71
7. RECOMENDAÇÕES .....	72
8. REFERÊNCIAS .....	73

## 1. INTRODUÇÃO

No Brasil, apesar de crescentes problemas associados à erosão hídrica e presença de sedimentos e poluentes nos rios, os estudos de identificação das fontes são poucos. No que tange à problemática em relação a sedimentos, a realização de estudos hidrossedimentológicos apresenta-se como uma tarefa cada vez mais importante no gerenciamento de bacias hidrográficas, já que situações adversas decorrentes das transformações no ambiente podem acelerar a produção e o transporte dos mesmos e diminuir a vida útil dos corpos d'água.

Numa bacia hidrográfica, o uso e a ocupação do solo determinam o escoamento da água e a produção de sedimentos (MACEDO *et al.*, 2012). Os processos de erosão e sedimentação são fenômenos naturais do ciclo hidrogeológico da Terra. Contudo, têm sido modificados e acelerados devido ao rápido desenvolvimento das atividades humanas (RAMPINELLI, 2013).

Segundo Moro (2005), os problemas derivados dos sedimentos se avolumam à medida que há maior desenvolvimento e ocupação do espaço geográfico, tanto do ponto de vista da remoção como do ponto de vista da sedimentação. Ações antrópicas associadas às práticas de manejo incorretas do solo geram desequilíbrios em sistemas ambientais, degradação dos recursos naturais e perda gradativa da capacidade de produção (SENHORELO, 2000).

É sabido que o manejo inadequado de solo em áreas agrícolas refere-se à utilização de práticas agrícolas que alterem negativamente as propriedades físicas, químicas e biológicas que, por sua vez, comprometem a função básica do solo que é dar suporte a vida animal e vegetal. Fatores como a compactação do solo, a redução da matéria orgânica e a alteração da estrutura do solo concorrem para acentuar o processo erosivo.



Com a erosão do solo, os recursos hídricos também são afetados negativamente devido à transferência de sedimentos para os rios juntamente com a carga poluente a eles associadas (UZEIKA, 2009).

A produção de sedimentos é muito variável em uma bacia hidrográfica, das partes mais elevadas às planícies. Isto devido ao tipo de solo, cobertura vegetal, relevo, clima e outros. Entretanto, deve ser ressaltado que a retirada da cobertura vegetal em áreas com elevada declividade e alta pluviosidade intensifica o processo erosivo (SENHORELO, 2000).

O transporte de sedimentos é um processo natural que envolve remoção, transporte e deposição de material e faz parte da evolução da paisagem originando as formas geomorfológicas (SILVA, 2001).

O conhecimento sobre a transferência de sedimentos da bacia vertente até o canal fluvial necessita de investigação constante, visto que o desequilíbrio dos processos sedimentares em um rio pode ocasionar o aumento da ocorrência de enchentes, reduzir a vida útil dos reservatórios, prejudicar a prática da navegação e elevar os custos de tratamento de água (SCAPIN *et al.*, 2008; MINELLA, MERTEN e MAGNAGO, 2011; VESTENA, 2008).

Os modelos hidrológicos são ferramentas computacionais destinadas a representar matematicamente os fenômenos naturais que regem o movimento da água em uma bacia hidrográfica (FUKUNAGA, 2012), e a utilização da modelagem computacional para a previsão de perda de solo é viabilizada através da existência de inúmeros modelos de predição, que representam os componentes da erosão em diferentes formas e em diferentes níveis de precisão (SENHORELO, 2000).

O SWAT é um modelo matemático de parâmetro distribuído, que permite um número de diferentes processos físicos serem simulados em bacias hidrográficas, com o objetivo de analisar os impactos das alterações do uso do solo sobre o escoamento superficial e subterrâneo, produção de sedimentos e qualidade da água (SRINIVASAN e ARNOLD, 1994).

A Bacia Hidrográfica do rio Santa Maria da Vitória abastece boa parte da população da Região Metropolitana da Grande Vitória (ES), destacando-se ainda a sua importância ecológica por possuir na sua parte baixa o Ecossistema Manguezal. Além do abastecimento de água, esta Bacia também produz, através dos seus reservatórios, parte da energia elétrica que é fornecida para a população capixaba. Devido a sua importância para a população que abriga, esta é a área do presente estudo.

O trabalho simulou através de modelos hidrológicos a vazão e produção de sedimentos na Bacia do rio Santa Maria da Vitória utilizando como ferramenta o *Soil and Water Assessment Tools* (SWAT). O SWAT foi desenvolvido para as características de clima e solo norte americano, mas já permite ao usuário a alimentação do seu banco de dados com características físicas e químicas do local em que for utilizado, tornando-o uma ferramenta útil para diversos cenários.

## 2. OBJETIVOS

### 2.1. GERAL

Estimar a produção de água e sedimentos na Bacia do Rio Santa Maria da Vitória - ES, através da utilização de modelagem computacional.

### 2.2. ESPECÍFICOS

- Calibrar o modelo SWAT para a bacia do rio Santa Maria da Vitória;
- Modelar a produção de água para a bacia do Rio Santa Maria da Vitória, utilizando como ferramenta o *software* SWAT– *Soil and Water Assessment Tool*;
- Modelar a produção de sedimentos para a bacia do Rio Santa Maria da Vitória, utilizando como ferramenta o *software* SWAT– *Soil and Water Assessment Tool*;

### 3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo será destacado o que há de bibliografia publicada que auxiliou no desenvolvimento do presente estudo.

#### 3.1. EROSÃO

A erosão do solo tem sido a principal degradação ambiental, causando perdas de solo agricultável (CARVALHO *et al.*, 2009), assoreamento e contaminação dos cursos d'água, lagos e represas (VESTENA, 2008). Segundo Ananda e Herath (2003), a erosão do solo é uma das mais importantes causas de degradação ambiental em nações em desenvolvimento, causando implicações políticas, sociais e ambientais.

Machado e Vettorazzi (2003) afirmam que a principal causa da degradação das terras agrícolas é a erosão, a qual consiste nos processos de desprendimento e arraste de suas partículas, causadas pela ação da água e do vento. Deve-se ainda acrescentar que a erosão dos solos não causa problemas apenas nas áreas aonde ocorre, produzindo quase que sempre uma série de problemas em nível local ou até mesmo em grandes áreas, podendo reduzir a fertilidade dos solos e criar ravinas e voçorocas, o que torna, às vezes, impossível sua utilização agrícola.

Bertoni e Lombardi Neto (2010) afirmam que a erosão é causada por forças ativas, como características da precipitação, declividade, comprimento de rampa e a capacidade de infiltração no solo; e por forças passivas, como a resistência do solo à ação do cisalhamento da água e à densidade da cobertura vegetal. Acrescentam ainda que, desconsiderando a erosão eólica, todo processo erosivo necessita da presença de água sobre o relevo, considerando o impacto da gota no solo e o escoamento superficial como agentes erosivos principais.

O *splash* ou salpicamento é o estágio mais inicial do processo erosivo e é provocado pelo impacto das gotas de chuva no solo (GUERRA, 2009). A energia cinética desprendida aumenta com a intensidade da precipitação, da velocidade e do tamanho das gotas. O efeito é a desintegração dos agregados, o que facilita o transporte do material pelos fluxos de água. Além disso, as partículas de tamanhos menores preenchem os poros da superfície do solo e formam encrostas, que provocam a selagem e a diminuição das taxas de infiltração (LANZA, 2011).

A erosão hídrica do solo resulta da ocorrência simultânea de vários fatores associados ao efeito da erosividade das precipitações e a erodibilidade do solo, em que as principais fontes estão relacionadas ao uso do solo (topografia, cobertura vegetal, práticas de conservação e manejo) e a suas características físicas. A complexa interação entre estes fatores tornam difíceis a análise do processo erosivo e a quantificação da produção de sedimentos na bacia (MACEDO *et al.*, 2012).

Se o terreno tem pouca declividade, a água da chuva irá escoar menos e menor será o processo erosivo. Quando há vegetação, o impacto da chuva será atenuado porque o solo estará mais protegido. A velocidade de escoamento e o impacto das gotas da chuva no solo ficarão atenuados devido aos obstáculos, diminuindo assim a erosão. As raízes dão sustentação mecânica ao solo, tornando-o menos erodível. Além disso, as raízes mortas propiciarão canais para dentro do solo onde a água pode penetrar, diminuindo a água escoada pela superfície (SANGOI, 2007; MEDEIROS *et al.*, 2011).

### 3.2. HIDROSSEDIMENTAÇÃO EM BACIAS HIDROGRÁFICAS

A Bacia Hidrográfica pode ser considerada um sistema físico no qual a entrada deste sistema é o volume de água precipitado e a saída é o volume de água escoado pelo exutório, considerando-se como perdas intermediárias os

volumes evaporados e transpirados e também os infiltrados (TUCCI, 2000). Uma vez conhecidas as características físicas da Bacia Hidrográfica, é possível correspondê-las com o regime hidrológico da mesma.

São características da Bacia, a área de drenagem, comprimento dos cursos d'água, coeficiente de compacidade, fator de forma, ordem dos cursos d'água, densidade de drenagem, extensão média do escoamento superficial, sinuosidade, elevação média, declividade equivalente, curva hipsométrica e retângulo equivalente. E para a caracterização da bacia hidrográfica muitas são as metodologias difundidas. Pode-se fazer uso de técnicas mais rústicas, utilizando cartas topográficas e instrumentos de medição, ou de técnicas mais modernas, com o uso de programas que auxiliam na caracterização da Bacia, através de dados de entrada fornecidos pelo usuário.

De acordo com Monteiro (2003), reconhecer aspectos físicos quantitativos das bacias hidrográficas, como o uso e ocupação do solo e os parâmetros fisiográficos, é muito importante na etapa de formulação de projetos ambientais.

A delimitação da bacia a ser estudada deve levar em consideração uma série de fatores, como a disponibilidade de dados sobre a mesma. Para Porto e Porto (2008), o tamanho ideal de uma bacia hidrográfica é aquele que incorpora toda a problemática de interesse, que no caso do presente estudo é a área passível de modelagem em relação à produção de água e sedimento.

De acordo com o Política Nacional de Recursos Hídricos (PNRH), instituída pela Lei nº9.433/97, a bacia hidrográfica também é a unidade de gestão dos recursos hídricos. Assim sendo, faz-se necessário o conhecimento desta para propor ações de gestão e gerenciamento para a mesma.

Logo, faz-se necessário, de acordo com Minella (2004), considerar não só o tamanho da área das bacias hidrográficas, e sim a dinâmica e magnitude em que os processos ocorrem. Acrescenta-se ainda que os processos hidrológicos afetam a erosão do solo, o transporte de sedimentos erodidos, e deposição de

sedimentos e as características físicas, químicas e biológicas que, coletivamente, determinam a qualidade das águas, sendo elas superficiais e subterrâneas.

Paralelo ao ciclo da água existe outro ciclo, aberto, intimamente vinculado ao ciclo hidrológico e deste totalmente dependente, que envolve o deslocamento, o transporte e o depósito de partículas sólidas presentes na superfície da bacia, que por analogia com o ciclo continental da água pode ser chamado de ciclo hidrossedimentológico (BORDAS e SEMMELMANN, 1997).

O sedimento pode ser definido como a partícula derivada da rocha, ou de materiais biológicos, que pode ser transportada por fluido, ou ainda, como a partícula derivada da fragmentação das rochas, por processo físico ou químico, e que é transportada pela água ou pelo vento do lugar de origem aos rios e aos locais de deposição (CARVALHO, 2008).

Assim como é possível distinguir os principais fenômenos que compõe o ciclo hidrológico é também possível identificar os processos que regem o ciclo e o deslocamento de partículas sólidas, que em conjunto constituem o ciclo hidrossedimentológico. Esses processos são de desagregação, separação ou erosão, transporte, decantação ou sedimentação, depósito e consolidação (TUCCI, 2000). Ainda de acordo com Tucci (2000), dos seis processos descritos, dois (erosão e o depósito) se sobressaem pela maior importância de suas consequências e por seu papel chave na redistribuição dos sedimentos dentro de uma bacia hidrográfica, e com o passar do tempo, os processos em ação no ciclo hidrossedimentológico acabam por moldar as feições das bacias hidrográficas, principalmente quando a sua intensidade é maior do que os processos vinculados a sua dinâmica interna, dando-lhes as formas hoje conhecidas.

Quando ocorre uma chuva, parte de suas gotas chegam diretamente ao solo, devido à ausência de vegetação (precipitação direta) e a outra parte da chuva é interceptada pelas árvores ou vegetação (drenagem foliar). Tanto a precipitação direta quanto a drenagem foliar possibilitam que as partículas de

solo sejam removidas pelo impacto da gota da chuva, sendo dependente das características físicas e químicas do solo, que definem sua suscetibilidade à degradação (MINELLA *et al.*, 2007). Embora esporádicos, os deslocamentos dos sedimentos carregados pela precipitação direta e outros processos acabam provocando o remanejo e a redistribuição pela bacia de ponderáveis massas de partículas sólidas. Assim, quando a capacidade de armazenamento da água no solo é saturada, o excesso de água move-se a favor da declividade, carreando os sedimentos desprendidos (LELIS, 2011).

Carvalho (2008) afirma que o comportamento de uma bacia em relação à sedimentação é muito variável, desde as partes mais altas até as planícies. Isso depende das rochas e dos solos, da cobertura vegetal, das declividades, do regime de chuvas, bem como de outros fatores. De forma geral, nas porções mais altas de uma bacia hidrográfica há maior erosão e transporte de sedimentos. A erosão vai diminuindo da alta para a média bacia à medida que as declividades decrescem e as chuvas se tornam menos intensas, fora das regiões montanhosas. Na parte baixa da bacia há muita formação de colúvias, isto é, a maior parte dos sedimentos erodidos se distribui pelos terrenos.

Logo, na alta bacia, percebe-se maior erosão e transporte de sedimentos, enquanto, na parte baixa da bacia, observa-se, normalmente, menor taxa de erosão, ocorrendo formação de depósitos com forte processo de aggradação (MACHADO e VETORAZZI, 2003).

A produção de sedimento é intimamente relacionada com a precipitação (MORGAN, 2005) e, apesar do impacto da gota da chuva passar um papel importante na desagregação do solo é o escoamento superficial responsável pelo transporte e deposição do sedimento.

De acordo com Tucci (2000), os deslocamentos dos sedimentos carregados pelo escoamento superficial e outros processos acabam provocando a perda ou redistribuição pela bacia de consideráveis massas de solo, a ponto de alterar o ciclo hidrológico e afetar o uso, conservação e a gestão da bacia. Santos *et al.* (2001) corroboram afirmando que o transporte de sedimentos é



um processo natural que envolve remoção, transporte e deposição de material e faz parte da evolução da paisagem. Entretanto, os problemas derivados de sedimentos aumentam à medida que há maior desenvolvimento e ocupação do espaço.

São diversas as fontes que contribuem para as cargas de sedimento que atravessam uma seção de curso d'água. Dentre eles incluem-se: material erodido do leito, aporte de sedimento devido ao escoamento superficial sobre os terrenos da bacia, incluindo-se as estradas, voçorocas e sulcos e pela ação de precipitações. No período chuvoso, têm-se todas estas variáveis atuando sobre o resultado final de sólidos na seção de monitoramento. Por outro lado, no período seco, a erosão de leito é uma das principais fontes de sedimentos que passa por uma seção de controle (SENHORELO, 2000).

Deve-se acrescentar que, de acordo com Adriolo *et al.* (2008), a maior parcela da carga detrítica dos cursos d'água é proveniente da remoção detrítica das vertentes (*wash load*), ou seja, dos processos erosivos que ocorrem na bacia. Assim, reconhece-se que o transporte de sedimentos é governado pelos fatores hidrológicos que controlam as características e o regime de escoamento superficial e pelas características particulares que compõem a carga de sedimentos. Senhorelo (2000) relata que cerca de 30% das partículas desprendidas no processo erosivo chegam aos cursos d'água.

O transporte de sedimentos pelos rios é um fenômeno complexo, e de acordo com Carvalho (2008), a carga em suspensão é predominantemente maior que a de fundo (90% a 95%) no alto curso, e a carga de fundo vai crescendo à medida que a erosão na bacia vai diminuindo e a declividade do curso d'água também (65% a 90% de sedimento e suspensão).

Tem-se que a produção de sedimentos é a quantidade de solo erodido que é levada até o exutório da bacia e depende das características da precipitação, fatores físicos dos solos, características topográficas e cobertura do solo que por sua vez condicionaram a produção do material intemperizado, seu transporte e deposição nas vertentes e/ou canais fluviais (SCHULTZ, 2013).

Sedimentos transportados pelo rio, quando se acumulam nos reservatórios, podem causar-lhe danos tais como: redução do volume de água, prejuízos a navegação, danificação de turbinas, bloqueio de tomadas de água e comportas, dentre outras. Qualquer que seja a finalidade (armazenamento de água, geração de energia, etc.) o tamanho e as características de operação dos reservatórios estão sujeitos a ter a capacidade de armazenamento parcial ou totalmente tomada pelos sedimentos, causando o processo de assoreamento (GARCIA e CONÇALVES, 2011).

Uma das alternativas para a quantificação da perda de solo é a aplicação de modelos preditivos (SENHORELO, 2000). Dentre os muitos modelos que tentam exprimir a ação dos principais fatores que exercem influência nas perdas de solo pela erosão hídrica, estão os modelos conceituais distribuídos que simulam diversos processos no ciclo hidrossedimentológico (MACHADO e VETORAZZI, 2003).

### 3.3. MODELOS HIDROSSEDIMENTOLÓGICOS

É muito dispendioso e impraticável monitorar a erosão em toda a bacia hidrográfica, daí a necessidade de prever a erosão com o uso de modelagem (COCHANE e FLANAGAN, 1999).

A maior limitação ao uso dos modelos é a dificuldade em se trabalhar a grande quantidade de dados que descrevem a heterogeneidade dos sistemas naturais. Por esta razão, Sistemas de Informações Geográficas (SIGs) podem ser empregados na criação de banco de dados (MACHADO e VETORAZZI, 2003).

Mais que um sistema de apresentação e processamento de dados, os SIGs possuem módulos para a realização de operações analíticas, sobreposição e cruzamento de informações. Seu banco de dados permite a associação de

atributos e a realização de consultas, permitindo a análise e modelagem de informações espacialmente distribuídos (MINGOTI, 2009).

A modelagem hidrológica e SIG's, de acordo com Machado (2002), têm evoluído para o ponto em que as vantagens de cada sistema podem ser totalmente integradas dentro de uma poderosa ferramenta de análise de bacias hidrográficas.

Os modelos são uma representação da realidade, que traduzem de forma simplificada e generalizada as características mais importantes de situações reais (LEE, 1973 *apud* VON SPERLING, 2007). A simplicidade e generalidade dos modelos é devido ao fato de ser impossível e/ou inviável a tradução de todas as relações existentes entre os diferentes componentes de uma bacia hidrográfica em termos matemáticos (MORO, 2005).

De acordo com Silva e Crestana (2004) existem inúmeros modelos para a estimativa de perda de solo, os quais geralmente se distinguem pela existência de diferentes tipos de classificação, principalmente em função de:

1. Área de aplicação;
2. Se os algoritmos e as relações são baseadas em leis físicas ou leis empíricas;
3. Se o fluxo sub-superficial e/ou subterrâneo são considerados e;
4. Tipos de parâmetros que são simulados

No que se refere à produção e transporte de sedimentos, têm-se algumas características desejáveis. São elas (ANDRIOLO *et al.*, 2008):

1. Localização espacial das áreas com processos erosivos mais acentuados, favorecendo a tomada de decisões com medidas locais e mais eficientes, uma vez que atingem a fonte do problema;
2. Previsão do transporte de sedimentos quantitativamente no tempo e no espaço, facilitando assim o planejamento;

3. Estimativa das variações na carga de sedimento devido às alterações no uso do solo previstos para o futuro.

Foi observada a utilização de diversos modelos para a simulação da produção de sedimentos. São eles o *Water Erosion Prediction Project – WEPP*, *Areal Non-Point Source Watershed Environmental Response Simulation – ANSWERS*, *Kentucky Erosion Model – KYERMO*, *European Soil Erosion Model – EUROSEM*, *Chemicals Runoff and Erosion From Agricultural Management Systems – CREAMS*, *Simulation for Water Resources in Rural Basins - SWRRB* e o *Soil and Water Assessment Tool – SWAT*.

Assim, além de tornar possível a quantificação de sedimentos em uma bacia hidrográfica, o modelo deve fornecer um resultado razoável com a realidade daquela Bacia. Para tal, de acordo com Moriasi *et al.* (2012), a calibração e validação dos modelos hidrológicos são necessárias antes da utilização destes em pesquisas e/ou aplicação em situações reais. Para que calibração e validação destes modelos sejam possíveis, é necessário a identificação das fontes de sedimentos a vazão do corpo d'água e o monitoramento destes na área em estudo.

#### 3.4. SOIL AND WATER ASSESSMENT TOOLS – SWAT

O *Soil and Water Assessment Tool - SWAT* foi desenvolvido pelo *US Department of Agriculture, Agricultural Research Service*, nos Estados Unidos da América. Ele é resultado da síntese de outros dois modelos desenvolvidos no mesmo departamento, o *Simulator of Water Resources in Rural Basins* (SWRRB) e o *Routind Output to Outlet* (ROTO), além da incorporação de fatores diversos de outros modelos.

Além de ser de domínio público, possui as seguintes características:

- incorpora equações que descrevem as relações entre as variáveis do sistema;
- utiliza informações de fácil disponibilidade para as funções básicas;
- é computacionalmente eficiente, pois permite a simulação de bacias em diferentes escalas e com uma grande variedade de situações de uso e manejo do solo;
- determinístico e semiconceitual;
- permite simular longos períodos de forma contínua.

Os processos hidrológicos simulados pelo SWAT incluem o armazenamento pelo dossel, escoamento superficial, infiltração, evapotranspiração, escoamento lateral, drenagem, redistribuição da água de acordo com os perfis do solo, bombeamento de água, retorno de fluxo, recarga de corpos hídricos, poços e cargas de afluentes (ARNOLD *et al.*, 2012).

O SWAT opera com intervalo de tempo diário e foi projetado para prever o impacto causado pelo uso do solo no corpo hídrico em relação à alteração da vazão, produção de sedimentos e dispersão de compostos químicos nas bacias hidrográficas. No SWAT, as bacias hidrográficas são divididas em múltiplas sub-bacias, que são posteriormente divididas em *Hidrologic Response Units* – HRUs (Unidades de Respostas Hidrológicas) que consistem em áreas homogêneas em relação ao uso do solo, tipo de solo e topografia (ARNOLD *et al.*, 2012).

Subdividir a bacia em condições únicas possibilita ao modelo refletir as diferenças na evapotranspiração e outras condições hidrológicas para diferentes usos e solos. O escoamento é calculado para cada HRU e propagado para obter o escoamento total para a sub-bacia. Isso pode aumentar a precisão das previsões e fornecer uma melhor descrição física do balanço de água (ARNOLD *et al.*, 2012).

O ciclo hidrológico, impulsionado pelo clima, proporciona variáveis que devem ser estudadas, como precipitação diária, temperatura mínima e máxima do ar, radiação solar, velocidade do vento e humidade relativa do ar, que por sua vez controlam o balanço hídrico (ARNOLD *et al.*, 2012).

A precipitação é o início do ciclo hidrológico para o modelo SWAT, sendo um dos principais dados de entrada do modelo. Dessa maneira, todos os resultados de balanço hidrológico e de propagação, tanto de água quanto de sedimentos, simulados pelo SWAT, são dependentes da quantidade de água precipitada na bacia (UZEIKA, 2009). A entrada de dados de precipitação é diária, assim o modelo não possui definido o tempo de duração e a intensidade dos eventos, que somente seriam possíveis com discretizações sub-diárias para compreender que o evento não durou o dia todo e sim alguns minutos ou horas neste dia.

As simulações nas bacias hidrográficas são separadas na fase terrestre (*Land fase*) – que controla a dispersão da água, sedimentos e compostos químicos para o corpo d'água de cada sub-bacia e na fase aquática (*stream or routing fase*) que por sua vez estuda o movimento da água, sedimentos, etc., no corpo d'água até o ponto de descarga (ARNOLD *et al.*, 2012).

Ainda deve-se acrescentar que o SWAT é um modelo hidrológico integrado ao SIG ArcView®, que facilita a representação da bacia em *layers* como modelos digitais de elevação, tipo de solo, uso e ocupação do solo. A Figura 1 apresenta a sequência de dados de entrada e a visualização dos dados de saída do modelo SWAT.

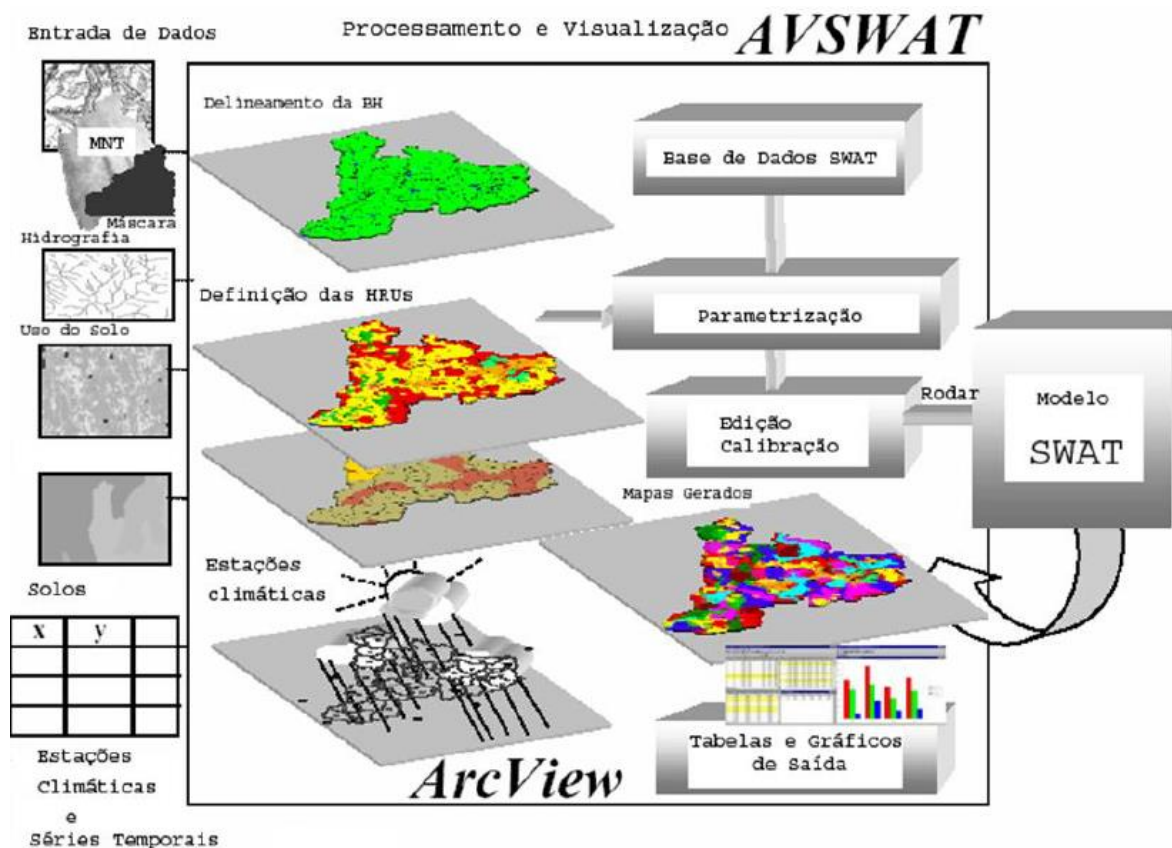


Figura 1. Sequência dos dados de entrada e a visualização dos dados de saída do SWAT  
Fonte: Galharte, 2011.

Como todo modelo matemático, o SWAT utilizará equações para a modelagem desejada. Para o Ciclo Hidrológico a equação utilizada é a de balanço de água, como é descrito por Neitsch *et al.* (2005) na Equação 02.

$$SW_t = SW_0 + \sum (R_{day} - Q_{surf} - E_a - W_{wep} - Q_{gw}) \quad \text{Equação 02}$$

Onde:

$SW_t$ : Quantidade Final de Água no Solo (mm  $H_2O$ )

$SW_0$ : Quantidade Inicial de Água no Solo

$R_{day}$ : Precipitação Diária

$Q_{surf}$ : Quantidade referente ao Coeficiente de *Runoff*

$E_a$ : Evapotranspiração diária

$W_{seep}$ : Quantidade de Água presente na zona de infiltração do solo

$Q_{gw}$ : Quantidade de Água referente ao fluxo de retorno

Deve ser observado que, por sua vez, a Equação de Balanço de Água tem como base físico-matemática a Equação de Conservação da Quantidade de Massa, que neste caso é representada pela quantidade de água presente no sistema.

A produção de sedimentos é provocada pelo escoamento superficial e computada para cada sub-bacia com a *Modified Universal Soil Loss Equation* – MUSLE (ARNOLD *et al.*, 2000), ilustrada na Equação 03.

$$Sed = 11,8[Q_{surf}q_{peak}area(HRU)^{0,56}K_{usle}C_{usle}P_{usle}L_{usle}CFRG] \quad \text{Equação 03}$$

Onde:

$Sed$ : produção de sedimento (ton/dia)

$Q_{surf}$ : escoamento superficial (mm/ha)

$q_{peak}$ : taxa de escoamento de pico (m³/s)

$area(HRU)$ : área de drenagem da sub-bacia (m²)

$K_{usle}$ : fator de erodibilidade do solo

$C_{usle}$ : fator de uso e manejo do solo

$P_{usle}$ : fator de práticas conservacionistas

$L_{usle}$ : fator topográfico

$CFRG$ : fator de aspereza

Sendo  $L_{usle}$  dada pela Equação 04:

$$LS_{usle} = \left(\frac{L_{hill}}{22,1}\right)^m [65,41\sin^2(\alpha_{hill}) + 4,56\sin \alpha_{hill} + 0,065] \quad \text{Equação 04}$$

Onde:

$L_{hill}$ : comprimento da encosta (m)

$m$ : termo exponencial

$\alpha_{hill}$ : ângulo do declive



E o termo exponencial varia com a declividade, sendo computado pela Equação 05.

$$m = 0,6 [1 - \exp(-35,835slp)] \quad \text{Equação 05}$$

A taxa de escoamento de pico é calculada pela fórmula Racional, apresentada na Equação 06.

$$q_{peak} = \frac{c.i.Area}{36} \quad \text{Equação 06}$$

Onde:

$c$ : coeficiente de escoamento superficial (expressa características de infiltração da bacia)

$i$ : intensidade da chuva (mm/h)

A propagação de sedimento no canal consiste de duas componentes simuladas simultaneamente (deposição e degradação). A quantidade máxima de sedimentos que pode ser transportada em um segmento é função da velocidade de pico do canal, dada pela Equação 07.

$$v_{ch,pk} = \frac{q_{ch,pk}}{A_{ch}} \quad \text{Equação 07}$$

Onde:

$q_{ch,pk}$ : vazão de pico (m<sup>3</sup>/s)

$A_{ch}$ : área da sessão do canal (m<sup>2</sup>)

Desta forma, a quantidade máxima de sedimentos que pode ser transportada na sessão é aquela apresentada na Equação 08.

$$conc_{sed,ch,mx} = c_{sp} v_{ch,pk}^{sp exp}$$

Equação 08

Onde:

$c_{sp}$ : coeficiente definido pelo usuário

$v_{ch,pk}$ : velocidade de pico do canal (m<sup>2</sup>/s)

$sp exp$ : expoente definido pelo usuário

Se a concentração máxima de sedimentos calculada pela formulação acima for maior que a concentração de sedimentos no início do processo, a degradação é um processo dominante, sendo esta expressa em toneladas, como pode-se observar na Equação 09.

$$sed_{dg} = (conc_{sed,ch,mx} - conc_{sed,ch,i}) V_{ch} k_{ch} c_{ch}$$

Equação 09

Onde:

$conc_{sed,ch,mx}$ : Concentração de sedimento máxima calculada

$conc_{sed,ch,i}$ : Concentração de sedimento no início

$V_{ch}$ : volume (m<sup>3</sup>)

$k_{ch}$ : fator de erodibilidade

$c_{ch}$ : fator de cobertura

Depois de calculado o sedimento depositado e degradado é possível determinar o sedimento suspenso no final do processo, pela forma apresentada na Equação 10.

$$sed_{ch} = sed_{ch,i} - sed_{dep} + sed_{dgr}$$

Equação 10

Onde:

$sed_{ch}$ : sedimento suspenso

$sed_{ch,i}$ : sedimento suspenso no início do processo

$sed_{dep}$ : sedimento depositado

$sed_{agr}$ : sedimento degradado

O modelo simula a produção de sedimentos em função das relações hídricas de precipitação e escoamento e calcula o volume de sedimentos que está sendo produzido. Então, com o aumento do volume de escoamento na fase terrestre há uma grande probabilidade do aumento da produção de maiores volumes de sedimentos que serão transportados pelo rio (LESSA, 2011).

Para o cálculo do escoamento superficial “*runoff*,” o modelo SWAT possui duas rotinas: utilizando a metodologia de curva-número - SCS-CN (*Soil Conservation Service – Curve Number*) ou através do método de infiltração de Green & Ampt, sendo que a metodologia padrão do modelo é a Curva-Número. A maior limitação desta metodologia é que ela não considera eventos de pico de chuva ou a duração dos eventos (KUWAJIMA, 2012).

Uma vez que o modelo simula a produção de sedimentos para cada sub-bacia, ele também apresenta a resposta desta modelagem segregada. Essa capacidade de resposta do modelo possibilita tomada de decisões diferenciadas dentro de uma mesma bacia hidrográfica, através da identificação de áreas onde os processos erosivos ou de contaminação ambiental sejam mais ativos (UZEIKA, 2009).

Garbossa *et al.* (2011) concluíram que o foco dos estudos realizados no Brasil era a verificação da aplicabilidade deste modelo às distintas características das bacias hidrográficas no Brasil. Como conclusão, viram que é elevado o potencial de aplicação deste modelo no Brasil, e que a maior parte dos estudos estão concentrados nas regiões sul e sudeste.

Quando aplicados em regiões sem muitos dados e com características climáticas, de solo, cobertura vegetal e técnicas de gerenciamento do uso do solo diferentes das Norte Americanas é necessário a calibração dos parâmetros utilizados pelo SWAT (BONUMA, 2011). Uzeika (2009) relata que o SWAT possui limitações para quantificar a água disponível no solo. Lima e Lopes (2011) também afirmam que a aplicação do SWAT em locais com características distintas daquelas de origem deve ser realizada com cautela.

Cabe salientar que o SWAT possui em seu banco de dados diversas classes de uso e ocupação e culturas, com suas características físicas, químicas e hidrológicas definidas a partir de experimentos (UZEIKA, 2009).

Findada esta primeira etapa com o uso do SWAT, faz-se necessário realizar uma análise de sensibilidade para os parâmetros de entrada, uma vez que a próxima etapa é a calibragem do programa. A análise de sensibilidade pode fornecer um melhor conhecimento sobre os parâmetros utilizados como *input* no SWAT e fornecer como eles influenciam na modelagem (FEYEREISEN *et al.*, 2007). Esta análise pode identificar os parâmetros mais sensíveis e quais os que devem ser dados mais atenção no processo de calibração (KANNAN, 2007). Arnold *et al.* (2000) destaca a importância desta análise, uma vez que assegura que a incerteza oriunda da variabilidade espacial dos dados de entrada seja levada em consideração

Van Griensven e Meixner (2006) corroboram, falando que é necessário que seja feito uma análise de sensibilidade, pois em virtude de existirem vários parâmetros de *input* que são operados pelo SWAT, apenas alguns possuem real importância para a calibração do modelo e para os respectivos *outputs* de uma determinada bacia.

### 3.6. SWAT-CUP

De acordo com Grunwald e Frede (1999), *apud* Machado (2002), o importante é que o modelo possa ser utilizado em situações onde nem todos os dados de entrada estejam disponíveis e que resultados razoáveis possam ser obtidos sem calibração, o que é um dos objetivos do modelo SWAT, ou seja, ser aplicado em bacias hidrográficas não monitoradas. Entretanto, deve-se estar claramente entendido que a calibração para as realidades brasileiras quase sempre é necessária e que erros na simulação são maiores sem ela.

A aceitação das diretrizes de calibração e validação trás diversas vantagens para o modelo, incluindo (BONUMA, 2011):

- Aplicação consistente do modelo, com resultados de alta credibilidade à assertividade;
- Melhor documentação e transparência dos modelos estudados, com condições de auditar o mesmo, reconstruir, repetir e reproduzir o modelo e seus resultados;
- Maior padrão e uniformidade nos resultados modelados e processos publicados;
- Desenvolvimento da avaliação e comparação de diferentes modelos aplicados em uma mesma área de estudo, ou o mesmo modelo aplicado em diferentes áreas;
- Base consistente para atribuir parâmetros e taxas para o uso em calibrações manuais ou automatizadas e análises de incertezas para o modelo;
- Promovem uma plataforma para o conhecimento e recomendações para os desenvolvedores dos modelos e usuários dos mesmos;
- Promovem os modelos matemáticos para futuros desenvolvedores e usuários, aumentando e expandindo o conhecimento em modelos de calibração e validação de hidrologia e qualidade das águas, aumentando a credibilidade destes.

A etapa de calibração é a realização de várias modificações nos parâmetros de entrada, optando-se pela configuração em que os valores estimados fiquem próximos dos medidos (FUKUNAGA, 2012).

Muitos são os estudos publicados que relatam como a validação e calibração são importantes para verificar a acurácia do SWAT para as condições nas quais ele foi aplicado (ARNOLD *et al.*, 2012).

De acordo com Arnold *et al.* (2012), o primeiro passo para a calibração e validação dos processos modelados pelo SWAT é a determinação dos parâmetros mais sensíveis para a bacia em questão. O usuário pode determinar quais variáveis devem ser ajustadas de acordo com a sua experiência ou através de uma análise de sensibilidade. O segundo passo é o processo de calibração em si. A calibração é um esforço para melhorar os parâmetros e adequá-los às condições simuladas, reduzindo assim as incertezas do modelo.

A calibragem em si é um processo complexo, pois a medida que alguma variável sofre interferência, o comportamento da modelagem responde de uma forma diferente, pois, o modelo está simulando o ciclo hidrológico que está ocorrendo na fase da superfície e na fase de sub-superfície.

A utilização de algoritmos de otimização para calibração de modelos hidrológicos computacionalmente intensivos está se tornando uma questão trivial (ZHANG *et al.*, 2009). Neste contexto, os próprios desenvolvedores do SWAT indicam a utilização de um aplicativo acessório, o SWAT-CUP (ABBASPOUR e SRINIVASAN, 2011 *apud* FUKUNAGA, 2012), voltado para procedimentos de calibração. A utilização do SWAT-CUP para calibração automática dos parâmetros torna mais rápido e prático o ajuste entre a vazão estimada pelo SWAT e os dados observados (FUKUNAGA, 2012).

O SWAT-CUP é um *software* gratuito que utiliza procedimentos os GLUE (*Generalized Likelihood Uncertainty Fitting*), Parasol (*Parameter Solution*),

SUFI2 (*Sequential Uncertainty Fitting*) e MCMC (*Markov Chain Monte Carlo*) para realizar análise de sensibilidade, calibração, validação e análise de incertezas.

No método SUFI2 (ABBASPOUR, 2012), a incerteza dos parâmetros é levada em consideração para todas as possíveis origens: modelo conceitual, parâmetros e valores observados. Neste método a calibração ocorre através de um sistema de seleção de intervalo de valores de parâmetros que são testados a cada interação a fim de estreitar este intervalo até chegar a um intervalo de confiança.

Abbaspour (2012) elege alguns passos a serem observados na calibração com o SWAT-CUP utilizando o SUFI2. São eles:

1. Cálculo da função objetivo;
2. Definição da função objetiva;
3. Estabelecimentos dos mínimos e máximos dos parâmetros físicos significativos;
4. Análise de sensibilidade dos parâmetros;
5. Primeira rodada do hipercubo latino – definição de limites e avaliação dos resultados;
6. Diminuição dos intervalos adotados até chegar num intervalo de interesse;
7. Cálculo da função objetivo.

Finalizado a calibração do modelo, deve-se, de acordo com Arnold *et al.* (2012), iniciar o processo de validação do modelo calibrado. Segundo Benaman, Shoemaker e Haith (2005), a validação é o reprocessamento da simulação realizada na calibração usando um período de dados diferentes como dados de entrada sem mudar nenhum parâmetros anteriormente ajustado.

A validação do modelo apresenta a especificidade deste para uma determinada situação. Geralmente, um bom modelo calibrado e validado deve incluir (ARNOLD *et al.*, 2012):

- Dados de chuvas intensas, períodos de secas e dados medianos;
- Múltiplas técnicas de avaliações;
- Avaliação de todos os constituintes calibrados;
- Verificação em outros modelos se os resultados encontrados são razoáveis.

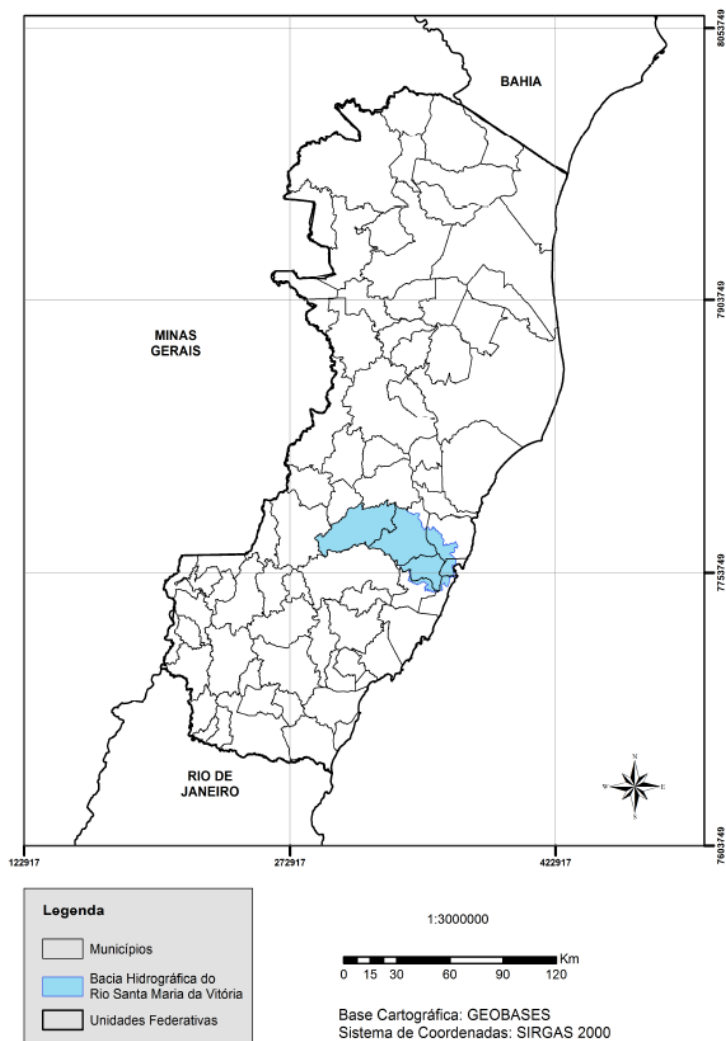


## **4. METODOLOGIA**

Neste Capítulo será apresentado como se desenvolveu o processo de modelagem e calibração para o presente estudo.

### **4.1. ÁREA DE ESTUDO**

A área de estudo é a Bacia do Rio Santa Maria da Vitória. O Rio Santa Maria da Vitória é um rio de domínio estadual, e integram sua bacia o município de Santa Maria de Jetibá (onde se localiza sua nascente), e parte dos municípios de Cariacica, Santa Leopoldina, Serra, Viana e Vitória. O deságue desta bacia é na baía de Vitória. A bacia do Rio Santa Maria possui uma área de drenagem aproximada de 1.844 km<sup>2</sup>. Alguns de seus principais afluentes são os rios Possmouser, Claro, São Luís, Bonito, da Prata, Timbuí, Mangaraí, das Pedras, Caramuru, Duas Bocas, Triunfo e Jequitibá. A população abastecida por esta Bacia é de 641.512 pessoas (IBGE, 2010). A Figura 2 ilustra a bacia em questão.



**Figura 2. Bacia do Rio Santa Maria da Vitória (em destaque).**  
**Fonte: Rampinelli (2013).**

A principal nascente do Rio Santa Maria da Vitória corresponde ao seu formador, o córrego Santa Maria, localizado no município de Santa Maria do Jetibá. Este curso d'água desce uma serra cuja cumeeira é o divisor de águas com a Bacia do Jucu, com altitudes em torno de 1200 m, próximo ao povoado de Alto Santa Maria (OLIVEIRA, 2003).

Devido às diferenças de altitudes, relevo e clima, a bacia do Rio Santa Maria da Vitória é convencionalmente dividido da seguinte forma (CSMJ, 2014):

- Alto Santa Maria da Vitória: da nascente até a represa de Rio Bonito (20% da área);
- Médio Santa Maria da Vitória: da represa de Rio Bonito até a cidade de Santa Leopoldina (52% da área);
- Baixo Santa Maria da Vitória: da cidade de Santa Leopoldina até a foz (28% da área).

A distribuição da chuva anual na Bacia do Santa Maria da Vitória mostra o quanto ela é dotada de grandes contrastes, visto que os totais anuais de chuvas vão desde menos de 1000 mm na extremidade sudeste da área até mais de 2000 mm à sota-vento das zonas serranas. Depreende-se de uma divisão da área focada em duas partes: uma do leste para o centro da Bacia, onde as isoietas tendem a crescer, e do centro para o oeste, onde as linhas de pluviosidade tendem a diminuir até o extremo oeste da bacia (OLIVEIRA, 2003).

A cidade de Santa Leopoldina é o marco divisor do rio: a montante da cidade, incluindo ela própria, existem as corredeiras e cachoeiras, enquanto que a jusante, o rio corre mais tranquilamente em seu leito até chegar ao mar (CSMJ, 1995).

Na Bacia do rio Santa Maria estão localizados dois grandes reservatórios que tem como objetivo armazenar água para a geração de energia: Rio Bonito e Suíça. As duas usinas hidrelétricas são de ponta, e geralmente, represam a água das 8 horas da manhã até às 17 horas da tarde e depois liberam das 17 às 8 horas (OLIVEIRA, 2003). Na Tabela 1 pode-se observar algumas características das mesmas.

Tabela 1. Características das Usinas Hidrelétricas de Suíça e Rio Bonito		
Características	Suíça	Rio Bonito
<b>Potência</b>	30 MW	15 MW
<b>N° de Turbinas</b>	2	3
<b>Área do Reservatório</b>	0,6 km <sup>2</sup>	2,2 km <sup>2</sup>
<b>Volume do Reservatório</b>	1.300.000 m <sup>3</sup>	26.350.000 m <sup>3</sup>
<b>Queda Líquida</b>	240 m	159 m
<b>Tensão de geração</b>	6,3 kV	6,3 kV

FONTE: Adaptado de ESCELSA, 2013.

Rio Bonito foi inaugurada em 1959, e possui reservatório cercado de reservas florestais e pequenas propriedades produtoras de hortifrutigranjeiros. Sua vazão máxima por turbina é de 4,4 m<sup>3</sup>/s por turbina e suas coordenadas (UTM) são 7072998,2207N e 51380,34584E. Suíça foi inaugurada em 1965, com vazão máxima de 8 m<sup>3</sup>/s e com coordenadas (UTM) 7778543,75N e 335125,91E (ESCELSA, 2013). Na Figura 3 observa-se a localização das usinas na bacia em estudo.

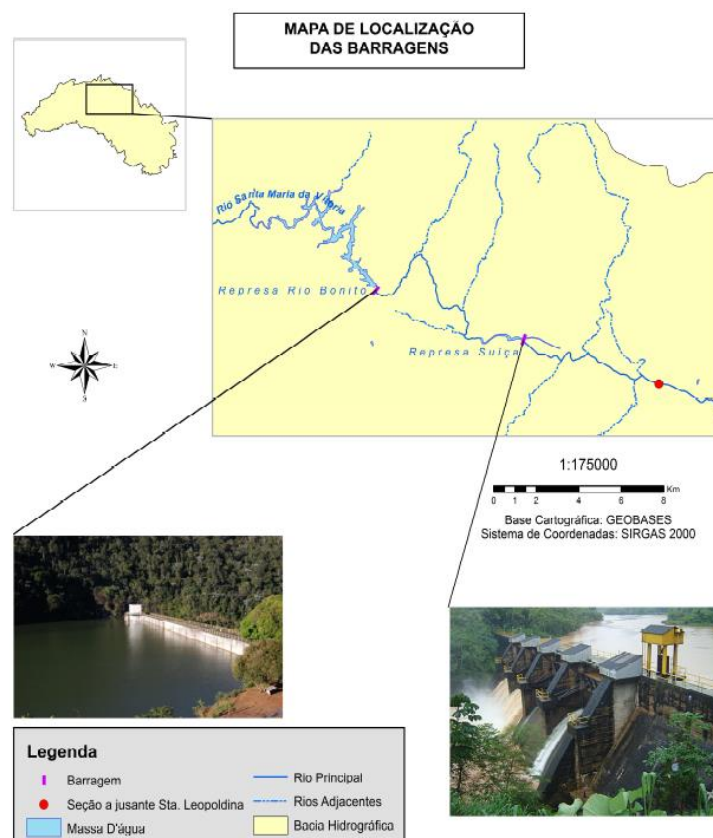


Figura 3. Localização dos Reservatórios de Rio Bonito e Suíça.  
Fonte: Rampinelli (2013).

## 4.2. DADOS PARA A MODELAGEM

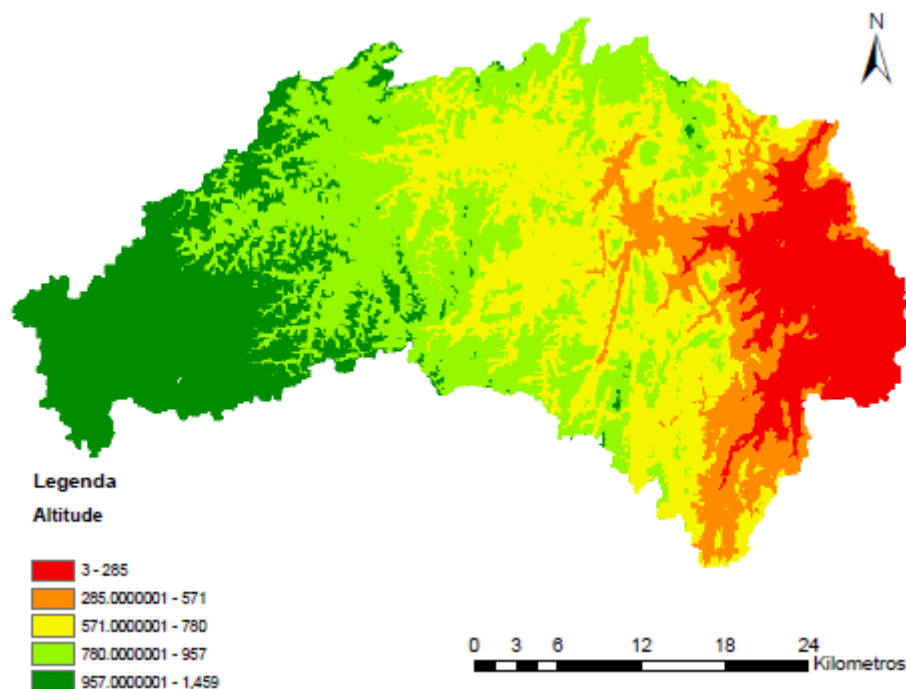
Para a modelagem da produção de água e de sedimentos utilizando como ferramenta o *software* SWAT foram necessários alguns dados de entrada. São os Planos de Informações: Modelo Numérico do Terreno (MNT), Arquivos em formato *shape.file* com dados de Uso do Solo e Tipos de Solo, que são inseridos no modelo pela sua interface com o ArcView®. Além dos dados alfanuméricos inseridos via ArcView® são também dados de entrada para a modelagem a precipitação, temperatura máxima e mínima, radiação solar, humidade relativa do ar e velocidade do vento. Como estes dados de entrada foram adquiridos e manipulados para a utilização no presente estudo será apresentado nos subitens a seguir.

### 4.2.1. Modelo Numérico do Terreno (MNT)

Segundo Chaplot (2004), sabe-se que a dimensão da malha do MNT deve ser escolhida com base na precisão do mapa de uso de solo disponível e vice-versa, tendo constatado em seus estudos que, em malhas superiores a 50 metros, a produção de sedimentos foi subestimada. Machado (2002) recomenda uma resolução de MNT de 10 a 30 metros para os estudos realizados em pequenas bacias e que um MNT muito detalhado, quando aplicado aos estudos hidrológicos, pode gerar canais paralelos na rede de drenagem que não correspondem à realidade. Tomando nota das observações de Chaplot (2004) e Machado (2002), buscou-se por um MNT com resolução entre 10 e 30 metros.

Imagens disponibilizadas pelo LP DAAC - ASTER (NASA), com pixels de 30 metros, foram solicitadas através do site <https://lpdaac.usgs.gov/>, e depois de disponibilizadas para download, foram utilizadas como MNT.

Entretanto, é sabido que o Baixo Santa Maria da Vitória possui grande parte de sua área ocupada pelo Ecossistema Manguezal, de complexa modelagem hidrológica e onde a aplicação do SWAT não é recomendável. Assim, truncou-se a Bacia do Santa Maria da Vitória, modelando o Médio e Alto Santa Maria da Vitória, resultando em aproximadamente 14630 km². O MNT da Bacia truncada pode ser observado na Figura 4.



**Figura 4. Modelo Numérico do Terreno para a Bacia Hidrográfica do Santa Maria da Vitória truncada.**

Como pode-se observar no MNT da Bacia truncada, as cotas variam de 3 a 1459 metros.

#### 4.2.2. Mapa de Uso e Ocupação do Solo

Para a elaboração do Mapa de Uso e Ocupação do Solo foram utilizados os *shapes* de Uso do Solo disponibilizados pelo Geobases (2014). Na Figura 5 observa-se o Mapa de Uso e Ocupação do Solo para a área em estudo, e no Gráfico 1 o percentual de área para os usos listados.

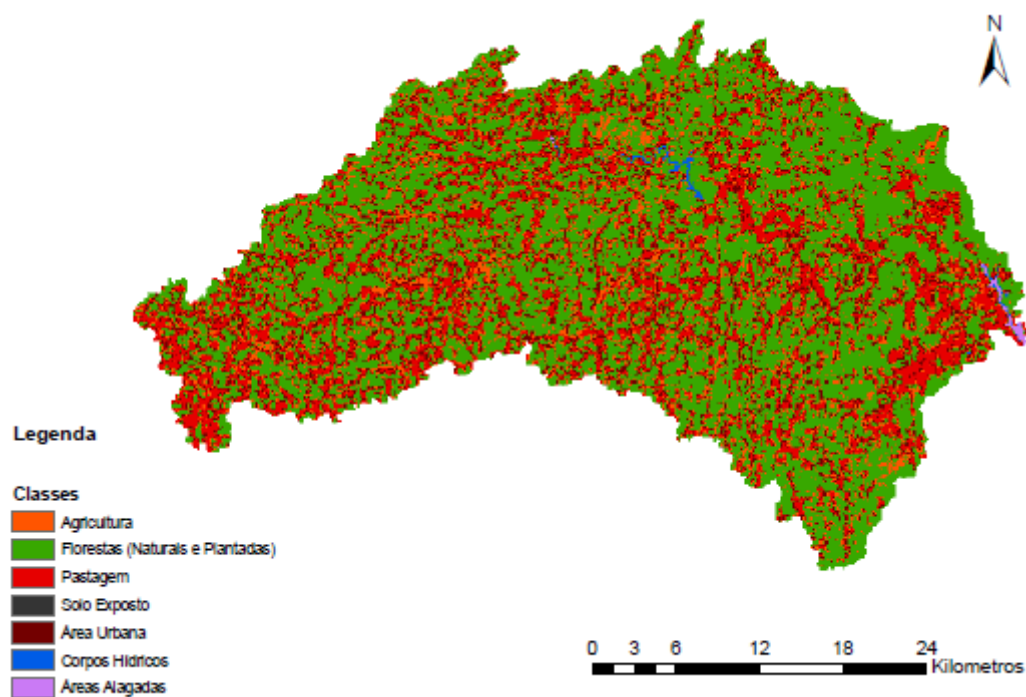
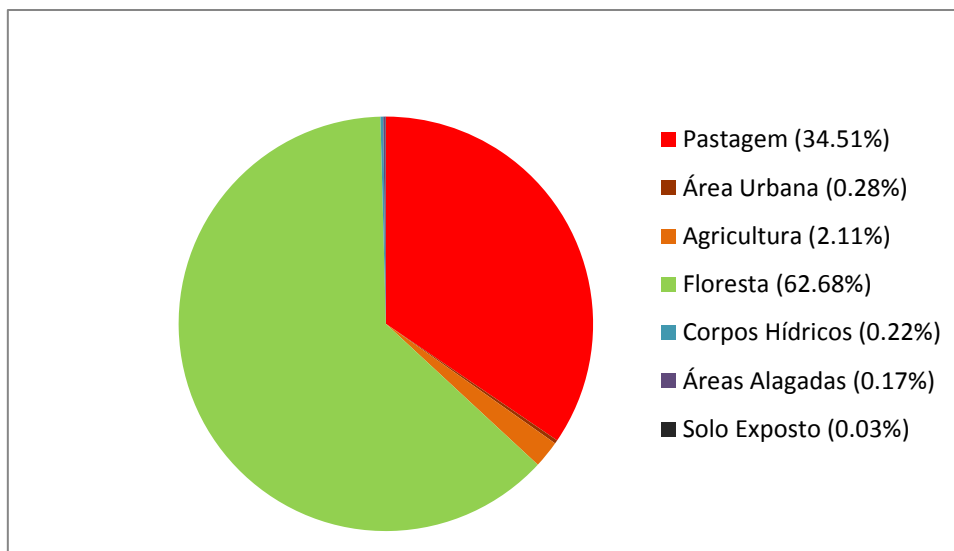


Figura 5. Uso e Ocupação do Solo para a Bacia truncada do Santa Maria da Vitória.



**Gráfico 1. Área (percentuais) para o Uso e Ocupação do Solo da Bacia truncada do Santa Maria da Vitória.**

Como ilustram a Figura 5 e o Gráfico 1, gerados a partir de dados disponibilizados pelo Geobases (2014), a maior parte do Uso do Solo da região estudada é de Florestas, observando que nesta classe encontram-se agrupadas as Florestas Naturais, Floresta Natural Primária ou Secundária Avançada, Floresta Plantada em Crescimento, Vegetação Natural Secundária, Restinga Arbustiva e Restinga Arbórea. Entretanto, o segundo maior uso do solo é para Pastagem, seguido pela Agricultura.

É sabido que Florestas auxiliam na retenção de sedimentos, fazendo que este seja de difícil desprendimento do solo e carreamento pelas águas superficiais. Porém, os usos Pastagem e Agricultura colaboram para um maior aporte de sedimentos até o corpo hídrico. Walling (2003), afirma que uma proporção significativa de sedimentos transportados até os rios provém das áreas agrícolas e a magnitude do processo é reflexo da degradação do solo.



### 4.2.3. Mapa de Solos

Para elaboração do Mapa de Solos da região de interesse foram utilizados os *shapes* de Solos disponibilizados por Embrapa (2012). Na Figura 6 observa-se este mapa para a bacia truncada do Rio Santa Maria da Vitória.

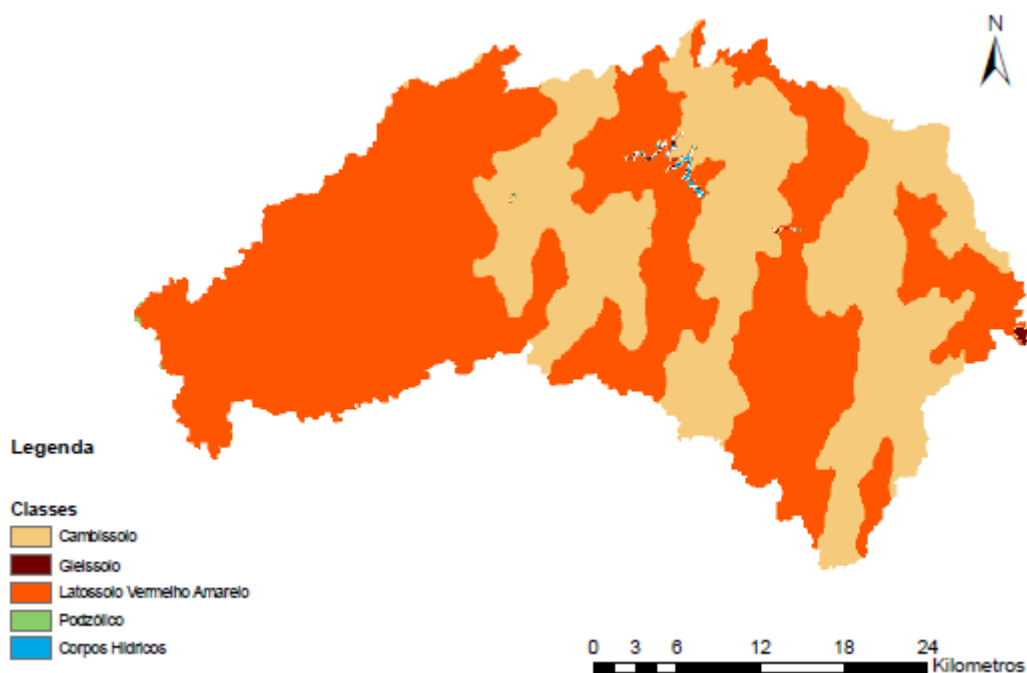


Figura 6. Mapa de Solos para a Bacia truncada do Santa Maria da Vitória.

Por ser um programa elaborado com base em experimentos realizados na América do Norte, foi necessário inserir no SWAT as características dos solos brasileiros. Para tal, utilizou-se como referência o estudo elaborado por Mercuri *et al.* (2009), no qual apresenta cada parâmetro de solo necessário para alimentar o banco de dados do SWAT. De acordo com os solos da área de estudo, os parâmetros inseridos no banco de dados do SWAT são aqueles apresentados na Tabela 2, e as características exigidas pelo SWAT são:

- NLAYERS: Número de *layers* de informação (número de horizontes);
- HYDGRP: Grupo de mínima saturação hidráulica (A, B, C ou D);
- SOL\_ZMX: Profundidade máxima do solo que a raiz alcança (mm);

- ANION\_EXCL: Fração de porosidade do solo;
- SOL\_Z: Profundidade de cada horizonte (mm);
- SOL\_BD: Densidade do solo (g/cm);
- SOL\_AWC: Capacidade de água do solo (mm/mm);
- SOL\_K: Condutividade hidráulica saturada (mm/hr);
- SOL\_CBN: Conteúdo do carbono orgânico do solo (% peso solo);
- CLAY: Porcentagem de argila no solo (%);
- SAND: Porcentagem de areia no solo (%);
- SILT: Porcentagem de silte no solo (%);
- ROCK: Porcentagem de cascalho no solo (%);
- SOL\_ALB: Albedo do solo;
- USLE\_K: Fator de erodibilidade do solo (0,013  $\text{tm}^2\text{hr/m}^3\text{tcm}$ )

Uma vez alimentado o banco de dados do programa, as simulações feitas contaram com as características dos solos tropicais da área estudada ao invés de aproximações.

**Tabela 2. Características físicas das classes de solo**

<b>Características</b>	<b>Cambissolo</b>	<b>Gleissolo</b>	<b>Latossolo VA</b>	<b>Podzólico</b>
<i>NLAYERS</i>	5	4	4	3
<i>HYDGRP</i>	B	B	B	B
<i>SOL_ZMX</i>	1100	1300	1500	1300
<i>ANION_EXCL</i>	0,47	0,39	0,38	0,32
<i>SOL_Z1</i>	300	80	360	200
<i>SOL_BD1</i>	1,6	1,4	1,5	1,7
<i>SOL_AWC1</i>	0,15	1	0,3	0,4
<i>SOL_K1</i>	12,5	12,5	12,5	90
<i>SOL_CBN1</i>	1,4	2,8	1,4	1,3
<i>CLAY1</i>	36,3	26,4	30,3	11,7
<i>SILT1</i>	18	71,5	16	18,1
<i>SAND1</i>	93,4	2,1	53,7	70,2
<i>ROCK1</i>	0	0	0	0
<i>SOL_ALB1</i>	0,15	0,16	0,15	0,15
<i>USLE_K1</i>	0,05	0,31	0,13	0,14
<i>SOL_EC1</i>	0	0	0	0
<i>SOL_Z2</i>	600	450	760	550
<i>SOL_BD2</i>	1,4	1,5	1,7	1,7
<i>SOL_AWC2</i>	0,18	0,1	0,3	0,4
<i>SOL_K2</i>	12,5	5	12,5	90
<i>SOL_CBN2</i>	0,6	00,7	0,2	0,6
<i>CLAY2</i>	34	37,8	29,8	18,8
<i>SILT2</i>	35,7	56,3	14,3	17,2
<i>SAND2</i>	30,3	5,9	55,9	64
<i>ROCK2</i>	0	0	0	0
<i>SOL_ALB2</i>	0,15	0,16	0,15	0,15
<i>USLE_K2</i>	0,16	0,3	0,14	0,15
<i>SOL_EC2</i>	0	0	0	0
<i>SOL_Z3</i>	800	750	1210	1300
<i>SOL_BD3</i>	1,4	1,6	1,7	1,7
<i>SOL_AWC3</i>	0,18	0,7	0,4	0,7
<i>SOL_K3</i>	12,5	40	12,5	12,5
<i>SOL_CBN3</i>	0,4	0,3	0,5	0,3
<i>CLAY3</i>	28,4	25,6	29,5	20,8
<i>SILT3</i>	37,7	62,4	13,8	18,3
<i>SAND3</i>	33,9	12	56,7	60,9
<i>ROCK3</i>	0	0	0	0
<i>SOL_ALB3</i>	0	0,16	0,15	0,15

USLE_K3	0,17	0,26	0,14	0,16
SOL_EC3	0	0	0	0
SOL_Z4	1100	1300	1500	0
SOL_BD4	1,8	1,7	1,6	0
SOL_AWC4	0,18	0,5	0,4	0
SOL_K4	40	12,5	12,5	0
SOL_CBN4	0,4	0,3	0,4	0
CLAY4	26,8	21,5	35,6	0
SILT4	43,7	57,3	15,9	0
SAND4	29,5	21,2	48,5	0
ROCK4	0	0	0	0
SOL_ALB4	0,15	0,16	0,15	0
USLE_K4	0,18	21	0,14	0
SOL_EC4	0	0	0	0
SOL_Z5	1170	0	0	0
SOL_BD5	1,4	0	0	0
SOL_AWC5	0,18	0	0	0
SOL_K5	12,5	0	0	0
SOL_CBN5	0,3	0	0	0
CLAY5	27	0	0	0
SILT5	39,9	0	0	0
SAND5	33,7	0	0	0

**FONTE:** Adaptado de Baldissera (2005) *apud* Mercuri et al. (2009)

#### 4.2.4. Dados Climatológicos

Os dados climatológicos utilizados como dados de entrada para a modelagem em questão (precipitação diária, temperatura máxima e mínima, radiação solar, umidade relativa do ar e velocidade do vento) foram aqueles solicitados e disponibilizados pelo setor de hidrometeorologia do Instituto Capixaba de Pesquisa, Assistência Técnica e Extensão Rural (INCAPER).

De acordo com Pontes e Fernandes (2002), para a obtenção de resultados confiáveis, a escolha das estações devem seguir dois critérios: o primeiro é que a série de dados pluviométricos das estações devem ser superior a 10 anos – exigência do modelo; o segundo critério é que as estações situem-se na mesma zona.

Desta forma, na escolha da estação foram observados a distância dela em relação à área de estudo, e os dados solicitados foram os da estação meteorológica do Instituto Nacional de Meteorologia - INMET, localizada na latitude 19°55'47,9"S, longitude de 40°34'47,9"W e a 648 metros acima do nível do mar, no município de Santa Teresa, Espírito Santo. Esta estação está em funcionamento desde o ano de 1977.

As informações climáticas foram ser organizadas em dados diários, em formato .txt de acordo com o solicitado pelo modelo.

#### 4.3. SWAT

A utilização do SWAT foi feita através da sua interface com o ArcGIS® 9.3 *Student*, o ArcSWAT. Nesta interface, é acionada uma barra de extensão da ferramenta

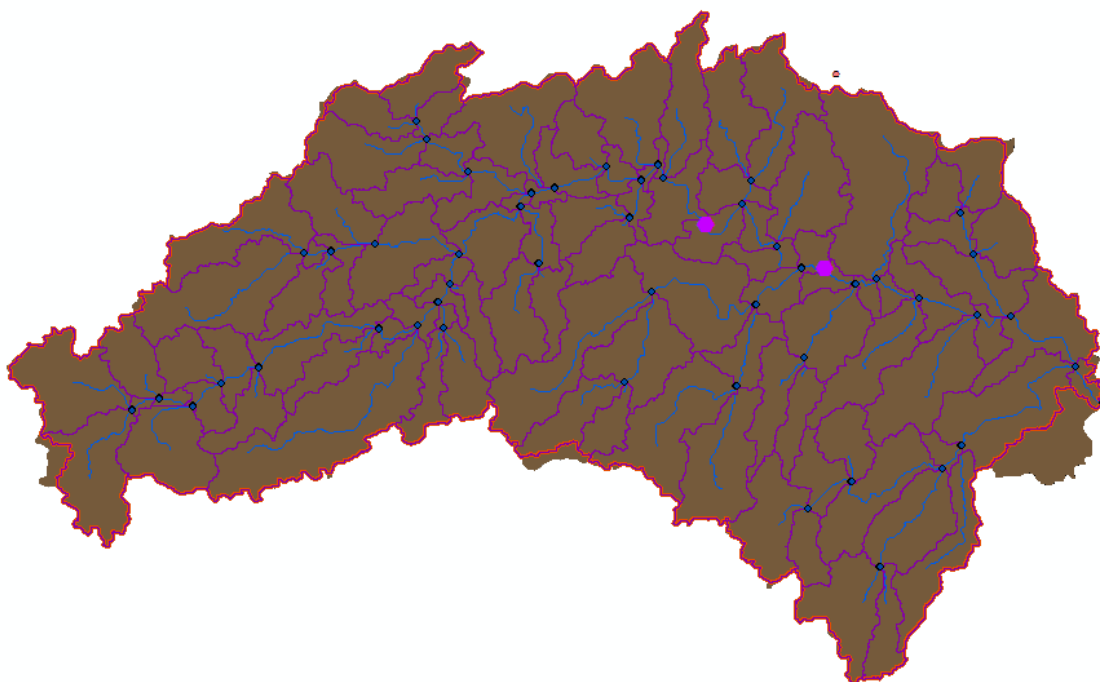
Adicionada a barra de extensão, foi criado um diretório no computador, na qual todos os arquivos utilizados na modelagem e os resultados da mesma foram armazenados. Deve-se acrescentar que a criação de um diretório diretamente no computador diminui o gasto de tempo computacional do mesmo. Uma vez criado o diretório, através do “*SWAT Project Setup*” o projeto de modelagem foi executado.

Para a delimitação da área a ser estudada, foi utilizado o “*Automatic Watershed Delineation*”. Inseriu-se a localização do MNT e da máscara criada para delimitar a área da Bacia a ser modelada. Uma vez carregado o MNT, o ArcHidro (ferramenta do ArcGIS® 9.3) cria as sub-bacias. Estas, por sua vez, foram comparadas com as Otto-bacias já delimitadas para a área, e como não apresentaram divergências significantes, preferiu-se manter as sub-bacias limitadas pelo ArcHidro.

Após esta etapa, definiu-se a direção do fluxo e possíveis áreas de acumulação. O SWAT apresentou que a área mínima para definir o fluxo de corpos hídricos seria de 645 ha, mas optou-se por adotar uma área de 700 ha. Definido o fluxo, criaram-se os fluxos e delimitaram-se os exutórios.

No SWAT é possível excluir, adicionar ou alterar os exutórios gerados automaticamente. Como na Bacia em questão temos dois reservatórios, teve-se que adicionar dois exutórios – um para cada reservatório, em suas respectivas coordenadas. Também excluiu-se aqueles exutórios que não eram afluentes do Rio Santa Maria da Vitória. Após a seleção dos exutórios de interesse, foram adicionados os reservatórios em seus respectivos exutórios.

As sub-bacias, rede de drenagem, exutórios e reservatórios gerados podem ser observados na Figura 7.



**Figura 7. Sub-bacias e Rede de drenagem geradas pelo “Automatic Watershed Delineation”.**

Para inserir os arquivos que subsidiarão a delimitação das HRU, é utilizado no menu “*HRU Analysis*” a ferramenta “*Land Use/Soils/Slope Definition*”. Na aba “*Land Use Data*”, classificou-se os tipos de uso do solo, de acordo com o Mapa de Uso e Ocupação do Solo, procedimento também seguido nas abas “*Soil Data*” e “*Slope*”. Após cada alimentação, o botão “*Reclassify*” foi acionado.

A interface do SWAT com o ArcGIS® permite a entrada de dados tabulares das propriedades de solo, uso e manejo do solo e clima. Observa-se que existe uma troca de informações destes dados tabulares, como os mapas de entrada e a localização do posto meteorológico informado. O SWAT gerou 2350 áreas com características únicas de declividade, uso do solo e tipo de solo.

No menu “*Write Input Tables*”, através da ferramenta “*Weather Stations*” foram inseridos os dados climáticos (precipitação, temperatura máxima, temperatura mínima, umidade relativa do ar, radiação solar e velocidade do vento) para a estação de Santa Teresa, assim como um arquivo com a localização

geográfica da mesma. Feito isso, a consolidação dos dados de entrada foi realizada, pelo comando “*Write All*”.

No menu “*Edit SWAT Input*”, através da ferramenta “*Reservoirs*”, foram inseridos os dados dos reservatórios, como volume, área e início das operações. Deve ser acrescentado que neste menu também foram inseridos os dados dos solos da área de estudo.

Uma vez alimentado o programa com os dados requeridos, iniciou-se os procedimentos para a simulação. Inicialmente delimitou-se o período de simulação (de 01 de janeiro de 2000 a 31 de março de 2014). Foram definidos os dados de saída requeridos e quantos anos seriam destinados ao “aquecimento” do programa (no caso em questão, 3 anos). Uma vez delimitados os dados de saída desejados, estes foram carregados através do comando “*Setup SWAT Run*” e depois iniciou-se a simulação pelo comando “*Run SWAT*”. Foram feitas simulações para produção de água e sedimentos com discretizações mensais e anuais. Tal procedimento foi realizado porque de acordo com Arnold *et al.* (2000), a análise da simulação de sedimentos deve ser feita com valores mensais, já que existem consideráveis incertezas na estimativa da vazão sólida.

Os dados simulados no SWAT foram extraídos da interface com o ArqGIS®, que utiliza dos recursos do ArcView® para processar na forma de mapas, gráficos, tabelas e informações geradas. Para comparar os dados simulados com os dados reais, utilizou-se os dados de vazão para a estação de Santa Leopoldina (ANA, 2014) e de sólidos suspensos (sedimentos) de Rampinelli (2013) e os disponibilizados pela ANEEL via email para a estação de monitoramento localizada a jusante da cidade de Santa Leopoldina. Rampinelli (2013) verificou a correlação entre o transporte de sedimentos em suspensão e a ocorrência de chuvas e vazão através do monitoramento dos mesmos na bacia do Santa Maria.

Finalizado a simulação, foi realizada a Análise de Sensibilidade dos parâmetros simulados. Ao todo foram analisados 32 parâmetros, apresentados na Tabela



3, sendo destes 26 para vazão e 6 exclusivos de sedimentos. Para o presente estudo foram necessárias 330 interações para a análise de sensibilidade dos parâmetros envolvidos.

**Tabela 3. Parâmetros utilizados para a análise de sensibilidade**

<b>Produção de Água e de Sedimentos</b>	
ALPHA_BF	Constante de recessão do escoamento de base (dias)
CH_K2	Condutividade hidráulica efetiva do canal ( $\text{mmh}^{-1}$ )
CH_N2	Coeficiente de Manning para o canal ( $\text{s/m}^3$ )
CANMX	Máximo de armazenamento do dossel (mm)
SLOPE	Declividade média da sub-bacia (m/m)
CN2	Número da curva na condição II de umidade (adm)
ESCO	Fator de compensação de evaporação do solo (adm)
GW_DELAY	Tempo de retardo do fluxo das águas subterrâneas (dias)
GWQMN	Água do aquífero profundo que retorna ao canal (mm)
GW_REVAP	Coeficiente de retorno da água do aquífero raso para a zona radicular (adm)
BIOMIX	Eficiência de revolvimento biológico (adm)
EPCO	Fator de compensação de águas pela planta (adm)
REVAPMN	Profundidade limite da água no aquífero raso para ocorrer o revap ou percolação para o aquífero profundo (mm)
SLSUBBSN	Comprimento médio da encosta da bacia (m)
SOL_K	Condutividade hidráulica no solo saturado (mm/h)
SOL_AWC	Capacidade de água disponível no solo (mm/mm)
SOL_Z	Profundidade de solo (mm)
SOL_ALB	Albedo de solo úmido (decimal)
SURLAG	Coeficiente de retardo do escoamento superficial (adm)
BLAI	Máximo índice de área foliar potencial (adm)
SFTMP	Temperatura de precipitação de neve ( $^{\circ}\text{C}$ )
SMFMN	Fator de derretimento de neve em 21 de dezembro (mm/dia $^{\circ}\text{C}$ )
SMTMX	Fator de derretimento de neve em 21 de junho (mm/dia $^{\circ}\text{C}$ )
SMTMP	Temperatura de derretimento de neve ( $^{\circ}\text{C}$ )
TIMP	Fator de retardo da temperatura do bloco de neve (adm)
TLAPS	Gradiente de temperatura ( $^{\circ}\text{C/km}$ )
<b>Produção de Sedimentos</b>	
USLE_P	Fator de Práticas Conservacionistas
SPCON	Máximo de sedimento que pode ser escoado por um canal ( $\text{ton/m}^3$ )
USLE_C	Fator de Uso e Manejo do Solo
SPEXP	Exponente definido pelo Usuário

**FONTE: Arnold et al. (2012)**

Finalizada a Análise de Sensibilidade dos Parâmetros, aqueles parâmetros mais significativos foram escolhidos para calibração, e os que não possuem influência nos resultados gerados descartados da próxima fase, para diminuir o gasto de processamento computacional.

#### 4.4. SWAT-CUP

Para a calibração do modelo SWAT aplicado a bacia truncada do Santa Maria da Vitória foi utilizado o *software* SWAT-CUP, versão 2012 – 5.1.6. Inicialmente, o SWAT-CUP leu os arquivos de entrada e saída do SWAT através dos arquivos “*TexInOut*” fornecidos pelo mesmo. A técnica escolhida para calibração foi a SUFI2.

Escolhidos os parâmetros de calibração, os intervalos nos quais estes se aplicavam foram delimitados, de acordo com os valores máximos e mínimos permitidos pelo SWAT.

Os dados monitorados foram adicionados ao SWAT-CUP, assim como o tempo de modelagem e anos utilizados para “aquecer o programa”. Uma vez alimentado o banco de dados, acionou-se a ferramenta “*Calibrate*” e em seguida foi escolhido a opção “*Execute all*” na janela “*Execute Calibration*”.

Na análise de sensibilidade realizada pelo SWAT foram identificados quais parâmetros influenciam na modelagem, tanto para vazão quanto para sedimentos.

Para vazão, dos 32 parâmetros avaliados, 21 devem ser levados em consideração, na respectiva ordem de importância: BLAI, ESCO, SOL\_AWC, CANMX, CN2, SOL\_K, GWQMN, SLOPE, CH\_K2, SOL\_Z, GW\_REVAP, ALPHA\_BF, REVAPMN, CH\_N2, EPCO, GW\_DELAY, BIOMIX, SOL\_ALB, SURLAG, USLE\_P e SLSUBBSN. Os parâmetros CH\_COV, CH\_EROD, SFTMP, SMFMN, SMFMX, SMTMP, SPCON, SPEXP, TIMP, TLAPS e USLE\_C não apresentaram sensibilidade alguma no que se refere à produção de água. Deve ser acrescentado que dos parâmetros que não apresentaram sensibilidade, cinco estão ligados diretamente à produção e derretimento de neve.

Já para a produção de sedimentos, 24 parâmetros mostraram influenciar o resultado desta modelagem. São eles, em ordem de importância, CN2, USLE\_P, ALPHA\_BF, CH\_K2, SPCON, CH\_N2, ESCO, CANMX, SOL\_AWC, SURLAG, SLOPE, BLAI, SOL\_Z, USLE\_C, SPEXP, SOL\_K, EPCO, SLSUBBSN, GWQMN, BIOMIX, GW\_DELAY, REVAPMN, GW\_REVAP e SOL\_ALB. Os que não afetam a produção de sedimentos são CH\_COV, CH\_EROD, SFTMP, SMFMN, SMFMX, SMTMP, TIMP e TLAPS. Deve acrescentar que, assim como para vazão, cinco dos parâmetros supracitados são referentes à produção e derretimento de neve, fenômeno não observado na bacia em questão.

Logo, tem-se que os cinco principais parâmetros para a produção de água são BLAI, ESCO, SOL\_AWC, CANMX e CN2, enquanto os mais sensíveis para a produção de sedimentos são CN2, USLE\_P, ALPHA\_BF, CH\_K2, SPCON. Estes foram os parâmetros escolhidos para a primeira etapa da calibração.

Para a segunda etapa da calibração foram adicionados outros parâmetros e foi observado a importância destes nos resultados apresentados. Logo, foram utilizados BLAI, ESCO, SOL\_AWC, CANMX, CN2, SOLK, GWQMN, CH\_K2, SOL\_Z, GW\_REWAP, ALPHA\_BF, USLE\_P, SPCON, CH\_N2, SURLAG e EPCON.

Segundo Neitsch *et al.* (2005), a calibração do balanço hídrico e da vazão devem ser feitos para as condições médias anuais, para depois refinar a calibração com os dados mensais ou diários.

Os dados (vazão e produção de sedimentos) utilizados para a calibração do modelo foram aqueles disponibilizados pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) através de solicitação realizada via email. Tais dados são referentes às estações de monitoramento a jusante e montante dos reservatórios de Suíça e Rio Bonito.

## 4.5. ANÁLISE ESTATÍSTICA DOS RESULTADOS

Dentre os parâmetros estatísticos para avaliação de estudos hidrológicos, foram escolhidos para o presente estudo o Coeficiente de Eficiência de Nash-Sutcliffe (COE) (NASH e SUTCLIFFE, 1970), a Tendência Percentual (PBIAS) e o Erro Quadrado Médio (EQM).

O Coeficiente de Eficiência de Nash-Sutcliffe (COE) consiste na Equação 11.

$$COE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (E_m - E_s)^2}{\sum_{i=1}^n (E_m - \bar{E})^2} \quad (\text{Equação 11})$$

Onde:

$E_m$ : Evento Monitorado;

$E_s$ : Evento Simulado;

$\bar{E}$ : Média dos Eventos Monitorados;

$n$ : número de eventos

O COE indica o quanto os pontos do gráfico de eventos monitorados versus os simulados se aproximam da linha com inclinação 1:1. Ele determina a magnitude relativa da variância residual comparado à variância do dado modelado (NASH e SUTCLIFFE, 1970), podendo variar de negativo infinito a 1, sendo 1 indicativo de um perfeito ajuste. De acordo com Moriasi *et al.* (2007), valores entre 0 e 1 são vistos como aceitáveis, enquanto valores negativos indicam que a média dos valores simulados descrevem melhor a situação do que o modelo, ou seja, que o desempenho do modelo é ruim.

A Tendência Percentual (PBIAS) pode ser calculado pela Equação 12 abaixo descrita.

$$PBIAS[\%] = \frac{\sum E_M - E_s}{\sum E} 100 \quad (\text{Equação 12})$$

Onde:

$E_M$ : Evento Monitorado

$E_s$ : Evento Simulado

O PBIAS representa a tendência média dos valores simulados serem maiores ou menores que os valores observados. Quanto menor o valor de PBIAS, melhor é o ajuste. Valores de PBIAS positivos indicam a tendência de subestimação dos dados simulados, enquanto que valores negativos de PBIAS indicam a superestimação (Gupta *et al.*, 1999).

O Erro Quadrado Médio (EQM) pode ser observado na Equação 13.

$$EQM = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (E_{M_i} - E_{s_i})^2 \quad (\text{Equação 13})$$

Onde:

$n$ : número de eventos

$E_M$ : Evento Monitorado

$E_s$ : Evento Simulado

O EQM deverá ser aproximar de zero, sendo que um EQM igual a zero significa que o modelo apresenta perfeitamente as condições do ambiente, e quanto mais distante de zero, mais ele deixa de ser representativo.

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo será descrito o resultado da modelagem com o SWAT e calibração com o SWAT-CUP, além da análise de aplicabilidade do SWAT para as condições estudadas.

### 5.1. MODELAGEM COM O SWAT SEM CALIBRAÇÃO

Devido à presença marcante do estuário na parte baixa da bacia do Rio Santa Maria da Vitória, esta foi truncada, com base no Modelo Numérico do Terreno (MNT), como já supracitado. A área da Bacia utilizada na modelagem com o *Soil and Water Assessment Tools* (SWAT) foi de 1289,10 km<sup>2</sup>. Esta área originou 96 sub-bacias hidrográficas e 49 exutórios, além dos dois inseridos para a alocação dos reservatórios das Usinas de Rio Bonito e Suíça. Na Figura 8 observa-se a subdivisão da bacia, assim como a localização dos exutórios e reservatórios.

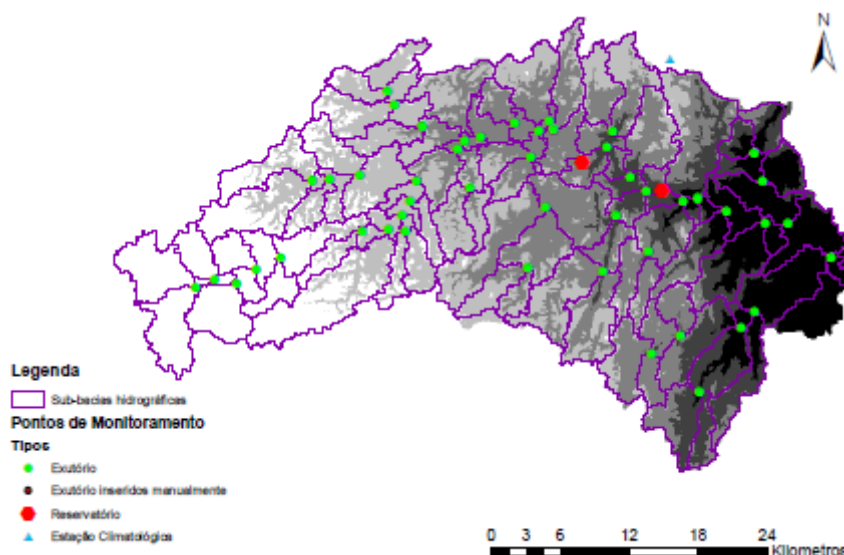
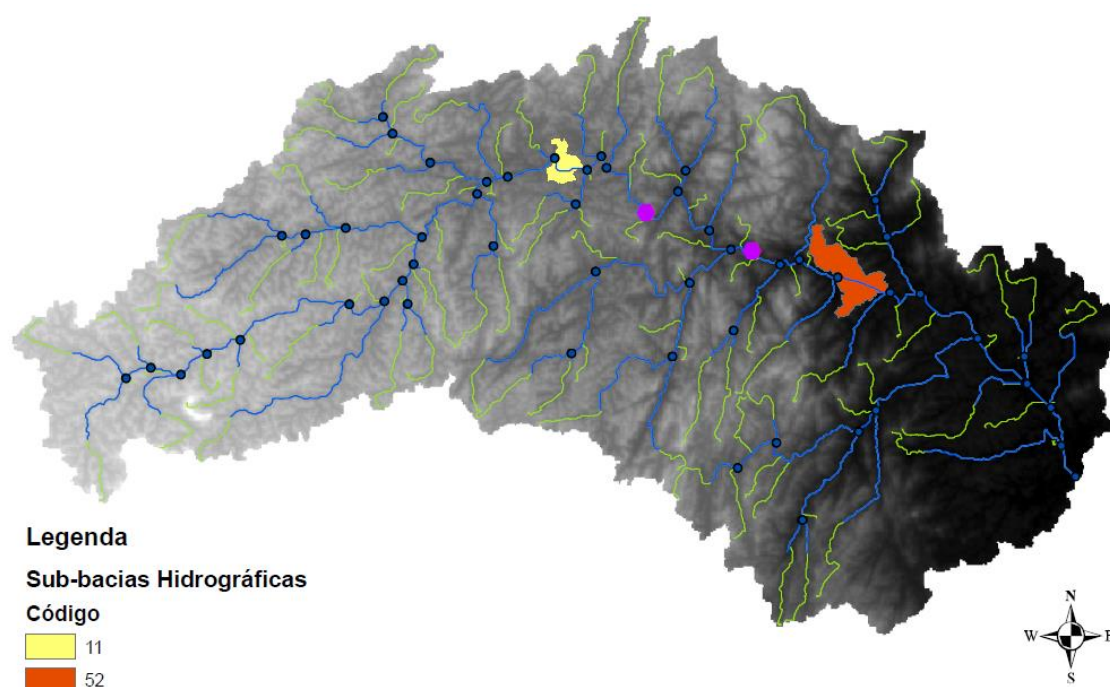


Figura 8. Bacia do Rio Santa Maria da Vitória truncada, com sub-bacias, exutórios e reservatório.

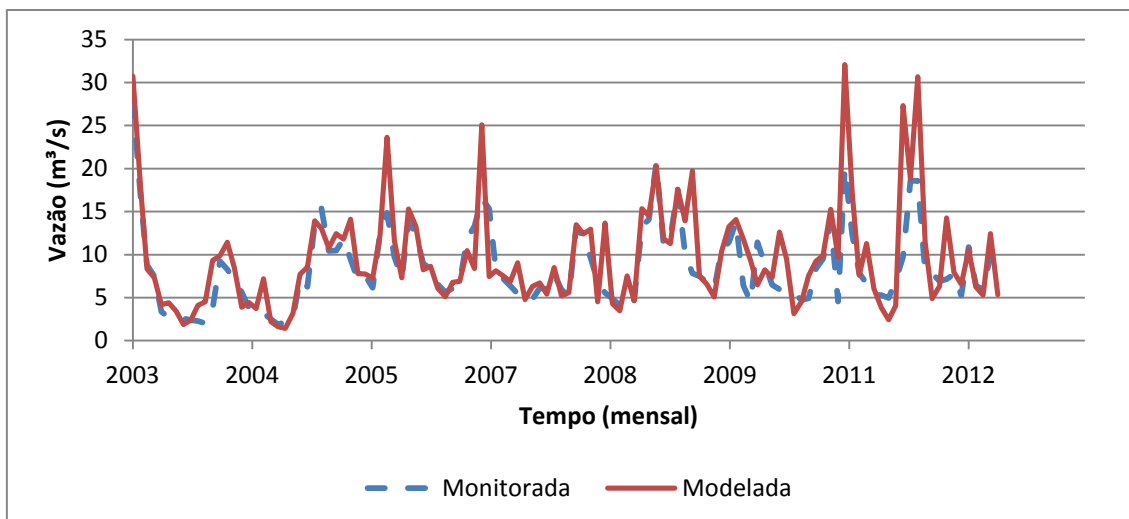
Inseridos os dados de entrada necessários a modelagem, como descrito no Capítulo 3 – Metodologia, e simulado a produção de água (vazão) e de sedimentos (sólidos suspensos e produção sólida) para a área do estudo, a modelagem foi realizada e foram obtidos arquivos no formato de banco de dados (.dbf) com os resultados fornecidos. Destes, foram elaborados os gráficos que seguem.

As estações de monitoramento estão localizadas a montante e a jusante dos reservatórios – nas sub-bacias 11 e 52, como pode ser observado na Figura 9.

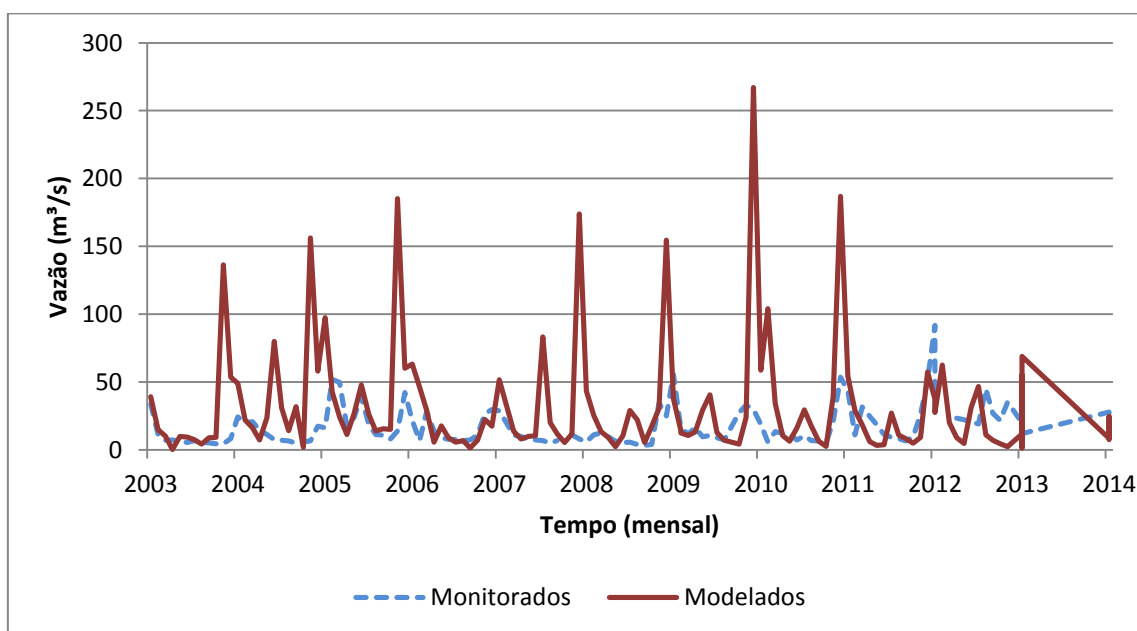


**Figura 9. Localização das sub-bacias 11 e 52.**

Desta forma, os dados de modelagem aqui apresentados são aqueles obtidos para estas sub-bacias. Logo, tem-se no Gráfico 2 e no Gráfico 3 as vazões mensais simuladas e as monitoradas para as mesmas. Deve ser acrescentado que os dados dos reservatórios apresentados no item 4.1 foram inseridos no modelo, para que o mesmo simulasse as vazões o mais próximo possível da realidade, considerando a operação destes.



**Gráfico 2. Vazão Simulada e Monitorada para a Sub-bacia 11 da Bacia truncada do rio Santa Maria da Vitória – a montante dos reservatórios.**

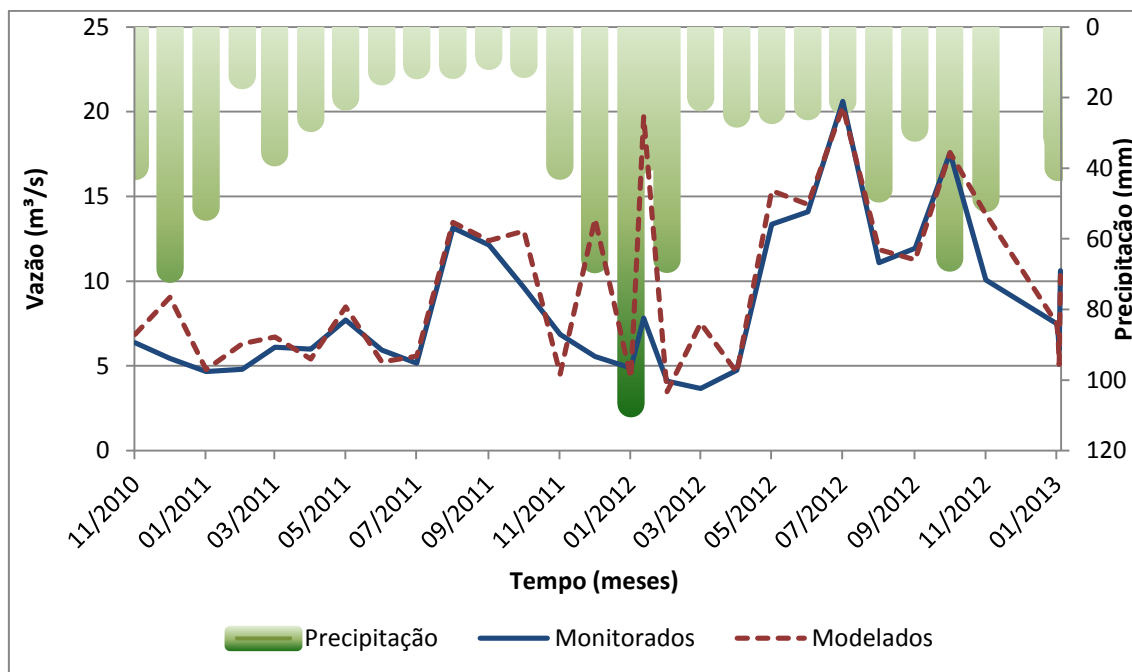


**Gráfico 3. Vazão Simulada e Monitorada para a Sub-bacia 52 da Bacia truncada do Rio Santa Maria da Vitória – a jusante dos reservatórios.**

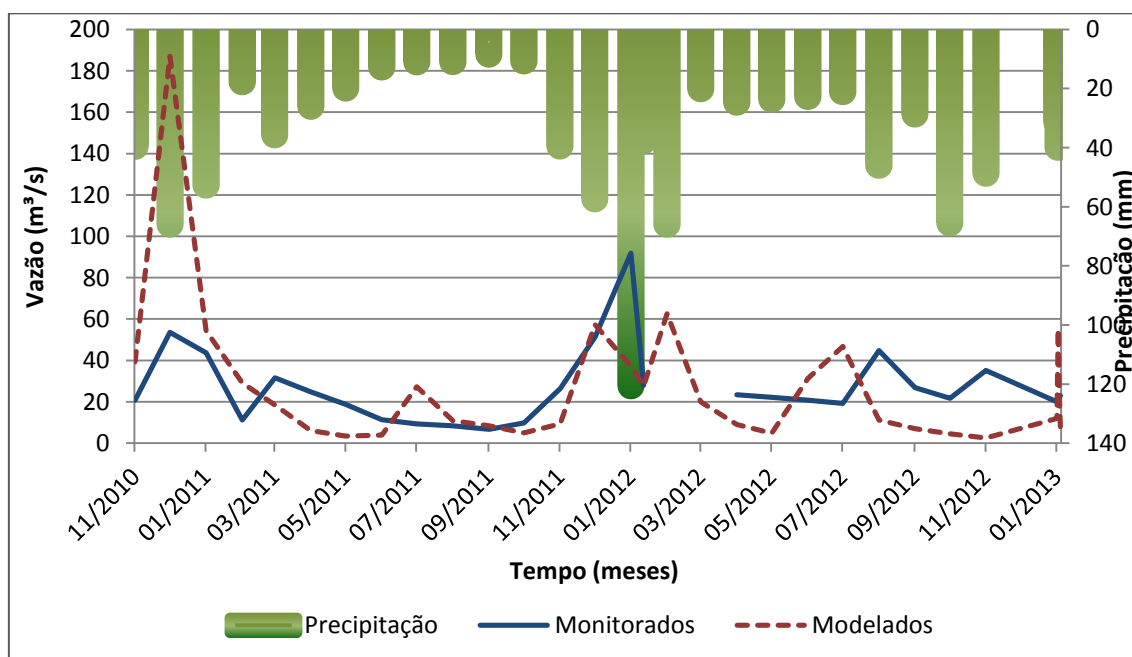
De acordo com as informações apresentadas no Gráfico 2 tem-se que o modelo seguiu a mesma tendência que foi monitorada na sub-bacia 11, observando que os picos foram superestimados para o período chuvoso (de novembro a março). Já o Gráfico 3 apresenta uma diferença significativa entre o resultado modelado e o monitorado. O modelo superestimou as vazões para o corpo hídrico na sub-bacia 52, e não acompanhou a tendência da mesma.



No Gráfico 4 e Gráfico 5 são apresentados as vazões mensais (modeladas e monitoradas) e a precipitação mensal para as sub-bacias em questão.



**Gráfico 4. Vazão (Modelada e Monitorada) e Precipitação para a sub-bacia 11 da Bacia truncada do Rio Santa Maria da Vitória – a montante dos reservatórios.**

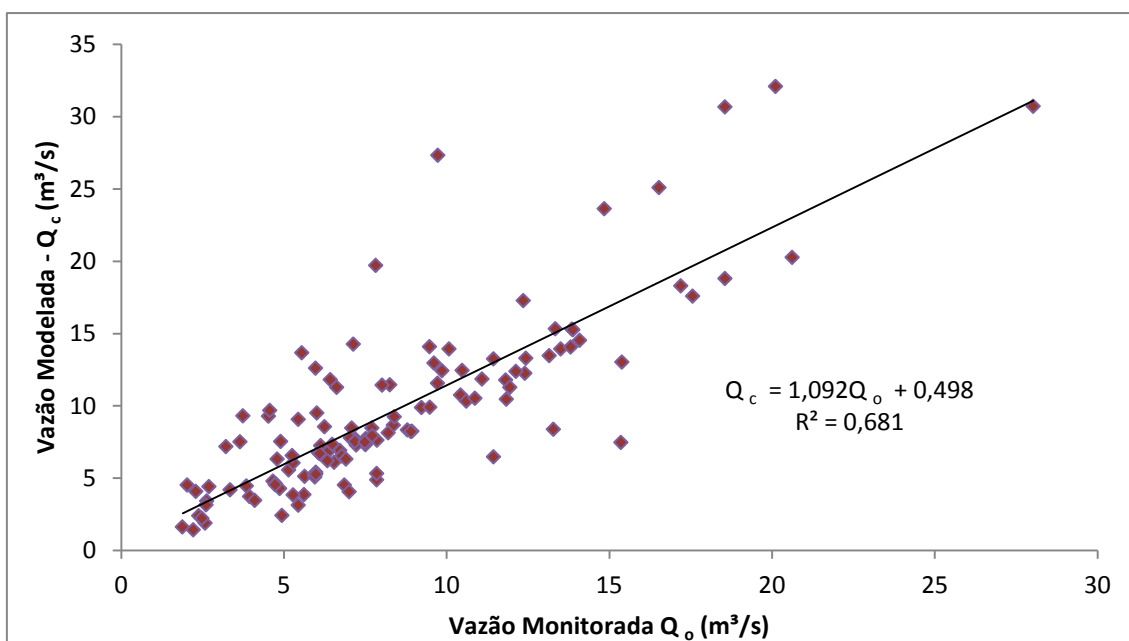


**Gráfico 5. Vazão (Modelada e Monitorada) e Precipitação para a sub-bacia 52 da Bacia truncada do Rio Santa Maria da Vitória – a jusante dos reservatórios.**

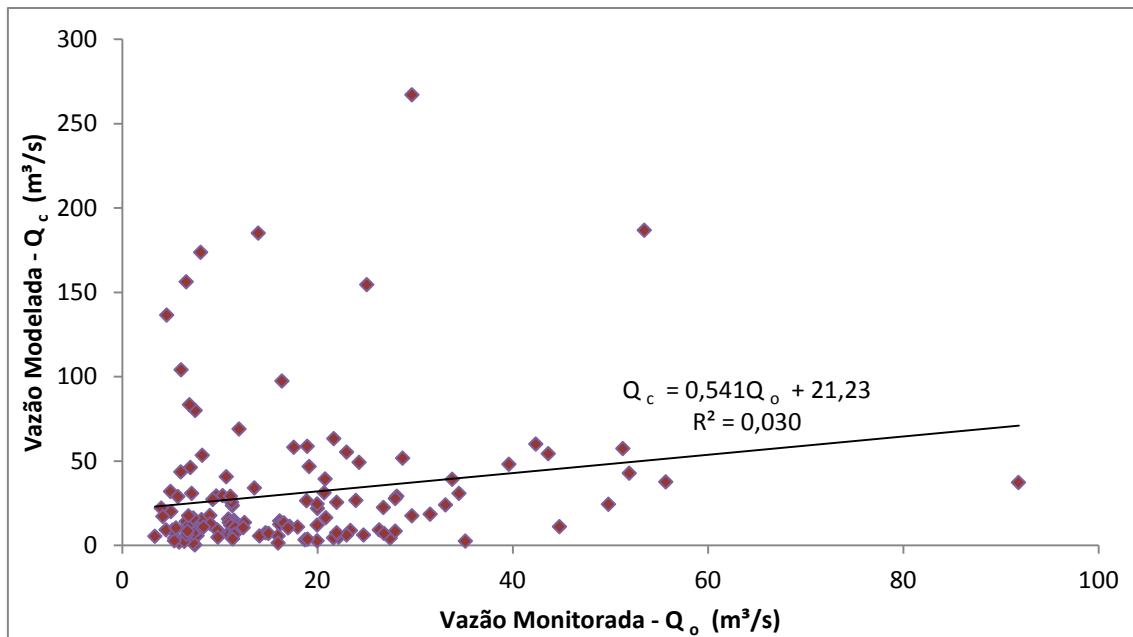
De acordo com o Gráfico 4, avalia-se a convergência entre os valores de vazão e precipitação para a sub-bacia 11, corroborando para a competência do programa em simular a produção de água desta sub-bacia.

No Gráfico 5 observa-se que em eventos chuvosos de grande proporção, a vazão foi superestimada na sub-bacia 52, fato que não é observado para precipitações de baixa intensidade.

Com o objetivo de avaliar a correlação entre as vazões modeladas e monitoradas, analisou-se o comportamento da linha de tendência linear e coeficiente de determinação ( $R^2$ ) destas vazões, como é ilustrado no Gráfico 6 e Gráfico 7.



**Gráfico 6. Correlação entre vazão modelada e monitorada para a sub-bacia 11 da Bacia Truncada do Rio Santa Maria da Vitória – a montante dos reservatórios.**



**Gráfico 7. Correlação entre vazão modelada e monitorada para a sub-bacia 52 da Bacia Truncada do Rio Santa Maria da Vitória – a jusante dos reservatórios.**

De acordo com os Coeficientes de Determinação, tem-se que a relação linear entre os valores modelados e monitorados na sub-bacia 11 ( $R^2=0,68$ ) é maior que aquela observado na sub-bacia 52 ( $R^2=0,03$ ).

Observando a localização das sub-bacias e ressaltando que entre as mesmas há dois reservatórios, pode-se afirmar, para os dados de entrada utilizados, que o SWAT possui melhor predição em valores sem a presença dos reservatórios (sub-bacia 11) do que aqueles que levam em consideração os reservatórios localizados na Bacia do Santa Maria (sub-bacia 52). Ainda supõe-se que o modelo de operação dos reservatórios (vazões liberadas e horários de liberação - não liberado pela concessionária) influenciou na modelagem, visto que utilizou-se como *input* dados gerais de operação.

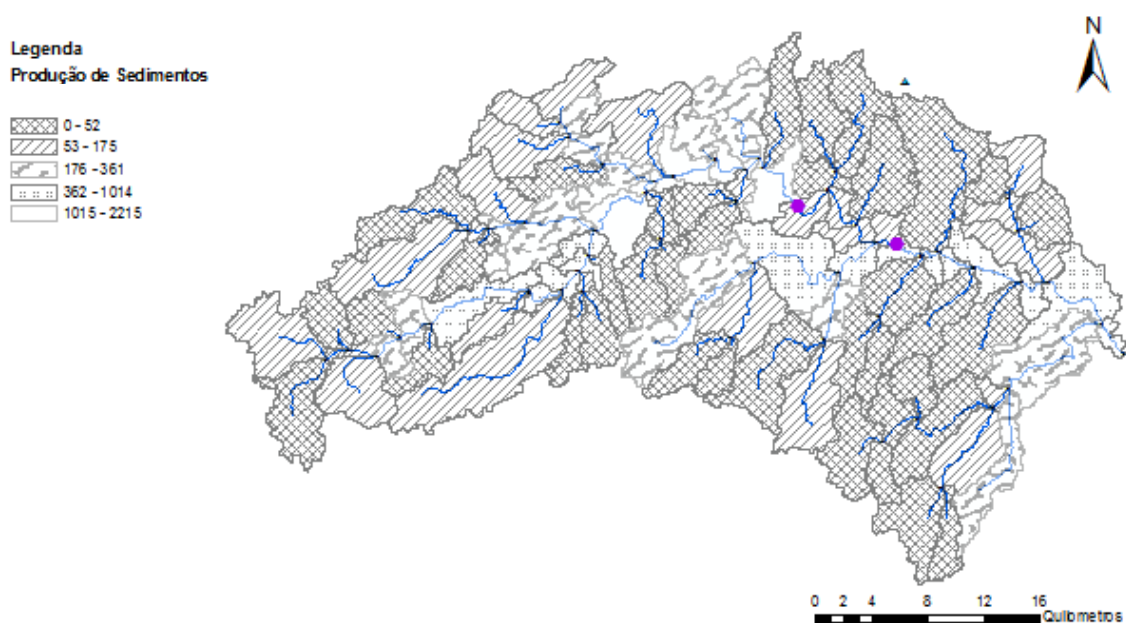
Também deve ser acrescentado que os valores superestimados na modelagem aqui apresentada possuem maior discrepância com os monitorados no período chuvoso. Tal fato pode ser atribuído ao baixo nível piezométrico que os reservatórios se encontram no início deste período. Desta forma, as chuvas intensas iniciais são armazenadas nos reservatórios, a fim de que os mesmos

encham. Só após atingir o equilíbrio que os mesmos liberam vazões maiores, de acordo com a chuva.

A título de comparação, o reservatório de Rio Bonito pode operar com cerca de 36% do seu volume total. Já o reservatório de Suíça, pode operar com cerca de 13% do seu volume total. Logo, as primeiras precipitações são direcionadas para o abastecimento destes, corroborando com as diferenças encontradas entre o modelo e os dados de monitoramento para a sub-bacia 52.

Uzeika (2009) simulou por cinco anos a vazão e produção de sedimentos com o SWAT e não obteve boa correlação. Entretanto, apresentou boa correlação entre vazão e precipitação, evidenciando a adequada transferência de água da fase *land* para o canal. Ela também evidenciou que os dados mensais para vazão eram superestimados. Kuwajima (2012) também testou o SWAT em uma Bacia Hidrográfica de Brotas (SP) e observou que os resultados modelados não condiziam com os monitorados, que também foram superestimados.

No tocante à produção de sedimentos, observa-se na Figura 10 a descarga sólida para as sub-bacias modeladas.



**Figura 10. Produção de Sedimentos – Descarga Sólida (ton/mês) para a Bacia truncada do Rio Santa Maria da Vitória, para o mês de março/2014.**

Das 99 sub-bacias, 31 apresentaram produção de sedimentos baixíssima, quatro muito baixa e nove baixa. Uma característica comum destas sub-bacias é que mais de 50% da sua área é ocupada por Florestas, corroborando com a afirmativa que este tipo de uso do solo diminui a erosão. Senhorelo (2000) e Caiado (2005) já afirmaram em seus trabalhos que o uso e a ocupação do solo é a maior responsável pela perda de solos e aporte de sedimentos.

Das sub-bacias com altíssima produção de sedimentos, tem-se que as três que apresentaram os maiores valores são aquelas nas quais estão localizadas os reservatórios de água. As cinco sub-bacias que possuem alta produção de sedimentos, quatro são sub-bacias que estão a jusante dos reservatórios e uma que é o exutório da bacia truncada do Rio Santa Maria da Vitória. Esta última é totalmente compreensível, visto que todo sedimento produzido na Bacia é direcionado para ela (mesmo que nem todo sedimento chegue), além da presença predominante de área alagada (brejo herbáceo).

Nas bacias com as maiores produções de sedimentos tem-se como uso predominante do solo a pastagem e agricultura, além da presença de áreas urbanas e solo exposto, como ilustra a Figura 11.

Lessa (2011) também encontrou em Botucatu (SP) a relação entre alta produção de sedimentos em áreas com Pastagem como uso do solo.

Os resultados apresentados por Marchioro *et al.* (2011) permitiram evidenciar que áreas com maior produção de sedimentos ocorrem em domínio de pastagens associadas à declividades entre 25 e 57%, nas encostas entre 15 e 28 metros de comprimento, em solos Argissolo Vermelho Amarelo, Neossolo Litólico e Cambiossolo Háplico, mostrando a necessidade de reflorestamento com espécies nativas nas áreas com estas características e a difusão de práticas de manejo e conservação do solo.

Cabe observar que o desmatamento ocorrido nestas áreas, para que fosse possível a utilização das mesmas, e a impermeabilização do solo da bacia

contribuem para uma maior parcela de escoamento superficial direto, através da redução da infiltração e da recarga do lençol freático (OLIVEIRA, 2003), o que possui como consequência a alta produção de sedimentos.

A fim de avaliar se a produção de sedimentos estava relacionada com a descarga sólida, foi elaborado o Gráfico 8.

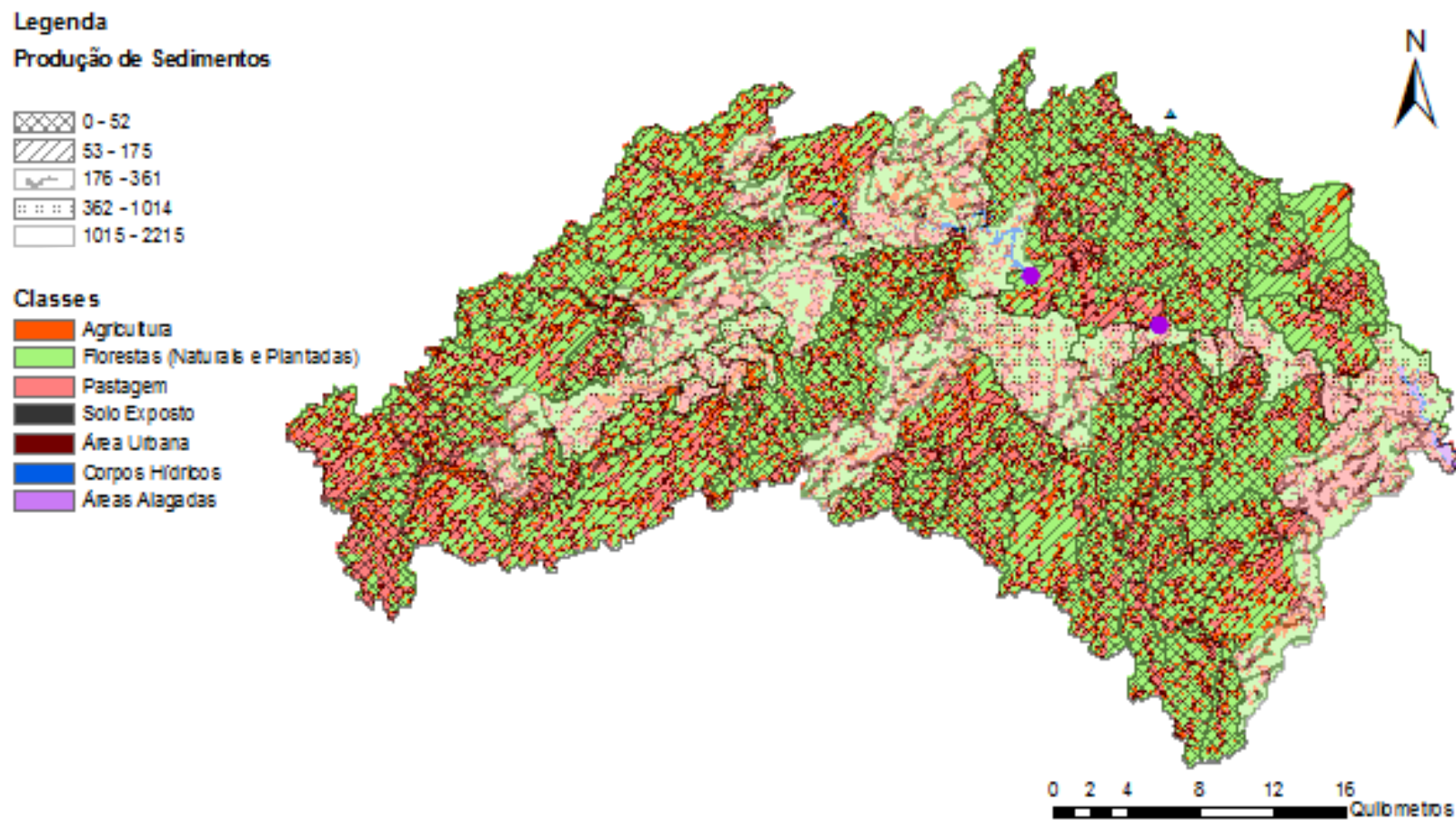
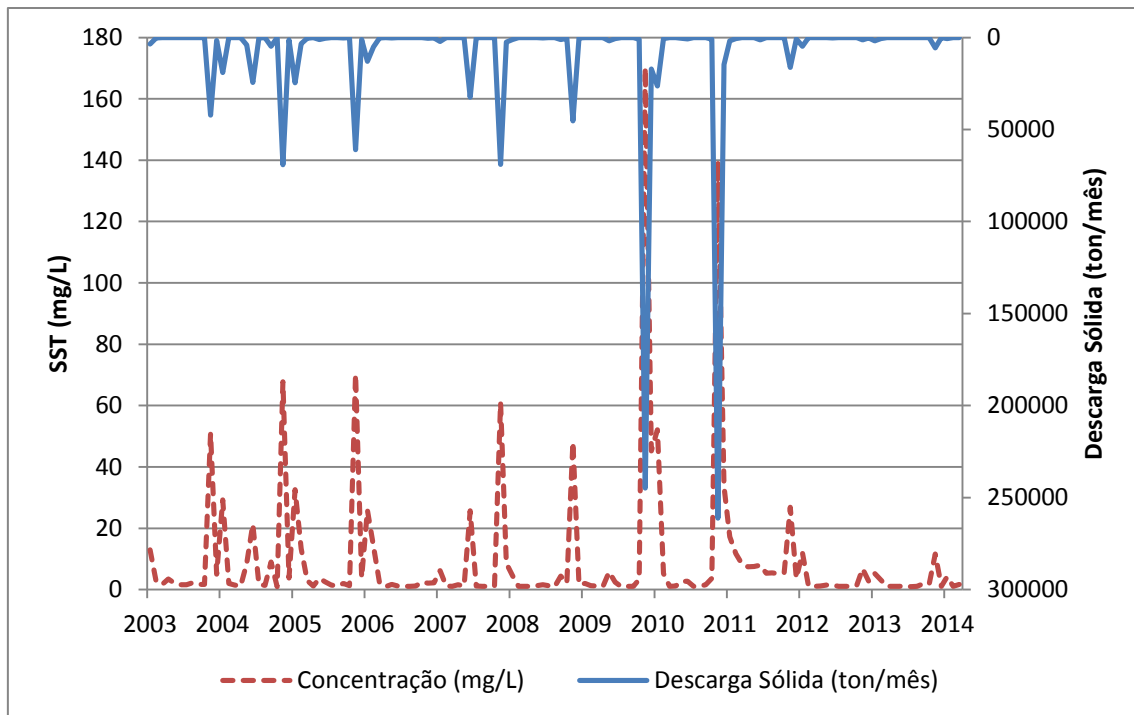


Figura 11. Produção de Sedimentos e Classes de Uso do Solo nas sub-bacias. Em destaque: Bacias com alta produção de sedimentos.

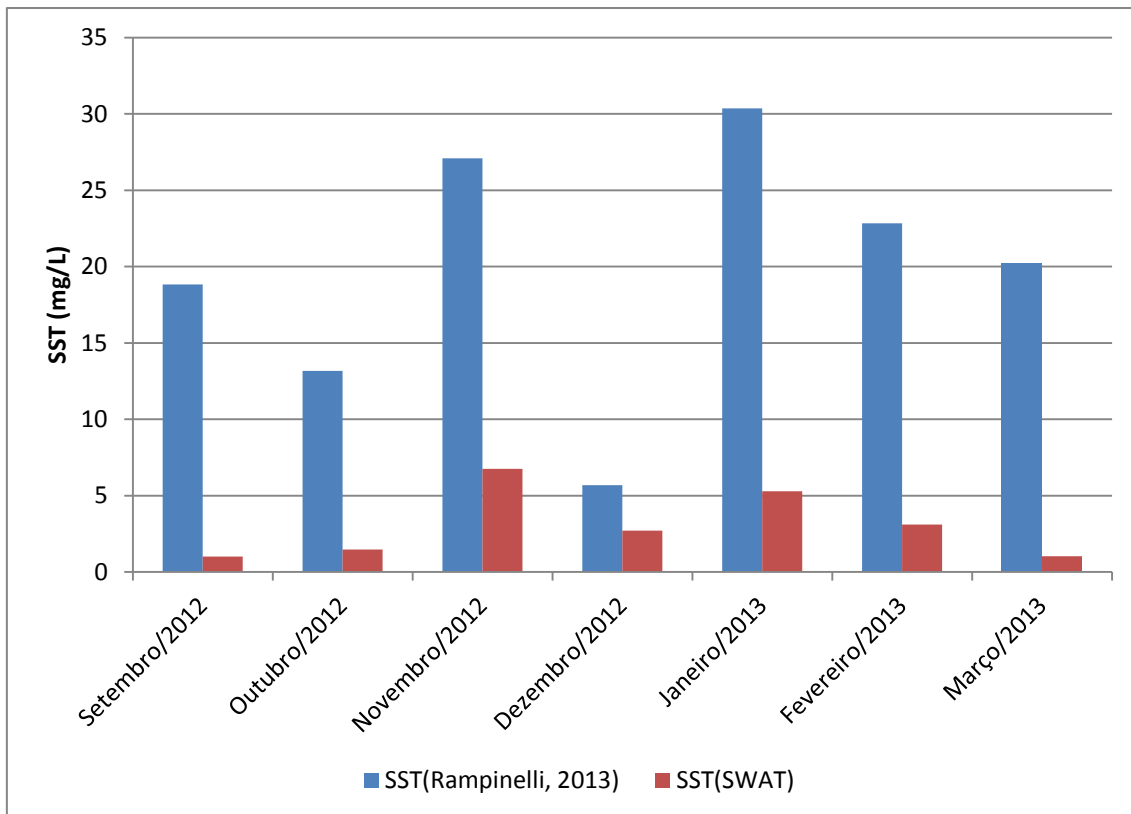


**Gráfico 8. Relação entre a Descarga Sólida e a Concentração de Sólidos Suspensos Totais (SST) para a sub-bacia 52 da Bacia truncada do Rio Santa Maria da Vitória.**

De acordo com o apresentado no Gráfico 5 tem-se que os picos de Descarga Sólida estão diretamente relacionados com os picos de concentração de sedimentos. Tal relação ilustra que os sedimentos gerados na bacia são escoados superficialmente até o canal, que para o caso apresentado é o Rio Santa Maria da Vitória.

Rampinelli (2013) monitorou por seis meses a concentração de Sólidos Suspensos Totais para o Rio Santa Maria da Vitória, na sub-bacia 52. As medições de descarga sólida de sedimentos em suspensão por Rampinelli (2013) foram realizadas pelo método de igual incremento de largura e igual velocidade de trânsito do amostrador USDH 59, com bico de 3/16". As médias mensais fornecidas por Rampinelli (2013) foram comparadas com as médias mensais modeladas pelo SWAT, e o resultado é apresentado no Gráfico 9.



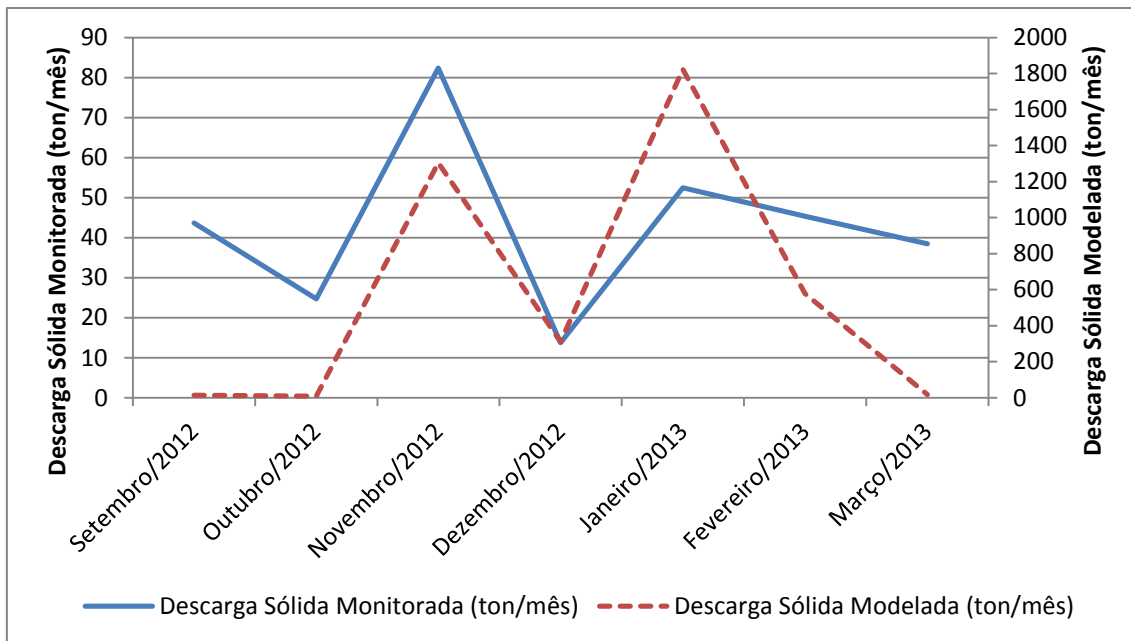


**Gráfico 9. Concentração de Sólidos Suspensos Totais Monitorados (Rampinelli, 2013) e Modelados.**

De acordo com o apresentado no Gráfico 9, tem-se que os valores modelados estão subestimados quando comparados com os monitorados.

Quando avaliamos a Descarga Sólida Monitorada por Rampinelli (2013) e Modelada, apresentada no Gráfico 10, observamos que os valores Monitorados são menores que os modelados, embora a tendência de picos e declínios continue sendo apresentada.

Devemos ainda acrescentar que para o cálculo da Descarga Sólida o modelo levou em consideração as vazões modeladas, o que pode ter resultado na superestimação deste parâmetro quando comparado com os Sólidos Suspensos.



**Gráfico 10. Descargas Sólidas Monitoradas (Rampinelli, 2013) e Modeladas para a sub-bacia 52 da Bacia truncada do Rio Santa Maria da Vitória.**

Analisando os meses nos quais os picos foram apresentados, observa-se que ocorreram chuvas de grandes volumes, sendo que em Novembro/2012, janeiro/2013 e fevereiro/2013 choveu respectivamente 202, 492 e 125 mm. Desta forma, o SWAT superestimou a descarga sólida de sedimentos em suspensão para chuvas intensas, o que já foi observado para vazão.

A correlação positiva entre precipitação intensa - aumento da vazão-aumento da descarga sólida já foi observada para a Bacia do Rio Santa Maria da Vitória por Oliveira (2003), que afirma que “os meses que ocorreram maior volume de precipitações e consequentemente aumento da vazão, contribuíram para elevar a descarga sólida em suspensão”.

Também deve ser ressaltado que nesta bacia está localizado o reservatório de Suíça, que possivelmente deve reter os sedimentos produzidos nesta sub-bacia, impedindo que os mesmos sigam o fluxo natural até o canal.

Shirivastava *et al.* (2003), *apud* Uzeika (2009), simulou a produção de sedimentos na pequena bacia de Chhokeranala, no leste da Índia, e justificou as discrepâncias em relação à produção de sedimentos encontradas em seus

resultados alegando que as equações de rotina de cálculo da propagação no canal são simplificadas e consideram as dimensões do canal como estáticas durante a simulação.

Outro autor que observou em seus resultados mensais a superestimação dos valores referentes à produção de sedimentos foi Uzeika (2009), afirmando que a aplicação do programa para a bacia rural, no tocante à produção de sedimentos, não se fez eficaz.

O fato dos resultados modelados divergirem dos monitorados pode estar relacionado com as características das práticas agrícolas brasileiras em relação às norte americanas. Observando-se que na região Serrana Capixaba há uma predominância de agricultura familiar, e acrescentado que Kuwajima (2012) descreve que esta pode ser muito desafiadora de ser modelada, principalmente por ser caracterizada pela baixa produtividade e alto emprego de insumos como água e fertilizantes, além da utilização de técnicas tradicionais.

Também deve-se destacar que as mesmas espécies de vegetais encontradas em países tropicais e em temperados apresentam um comportamento muito distinto para as duas condições de clima, o que pode ser atribuído principalmente ao fotoperíodo (Paterniani, 2001).

Para Hiepe (2008), o número de aplicações do modelo para as condições tropicais são poucas. A maior parte das aplicações registradas para o modelo são para as condições temperadas, o que tem como consequência a baixa alimentação do banco de dados com informações referentes à resposta deste para as áreas tropicais.

Em relação às análises estatísticas realizadas com os resultados no modelo simulado, pode-se observar na Tabela 4 e 5 os valores encontrados.

**Tabela 4. Análises Estatísticas para o Modelo Simulado – Sub-bacia 11**

	<b>COE</b>	<b>PBIAS</b>	<b>EQM</b>
<i>Vazão</i>	0,39	-11,77	12,02

**Tabela 5. Análises Estatísticas para o Modelo Simulado – Sub-bacia 52**

	<b>COE</b>	<b>PBIAS</b>	<b>EQM</b>
<i>Vazão</i>	- 9,61	- 42,63	1907
<i>Descarga Sólida</i>	- 17,50	-92,58	714479

De acordo com os coeficientes apresentados, tem-se que na sub-bacia 11, o COE apresentou-se como aceitável, enquanto o PBIAS indica que os valores modelados são superestimados, embora em pequenas magnitudes. Já o EQM indica que o modelo não corresponde à realidade do ambiente.

Em relação à sub-bacia 52, tem-se que nas análises estatísticas realizadas para vazão, o COE indica que os valores modelados de vazão são ruins. Já o PBIAS indica que o modelo superestima, em pequenas magnitudes, os valores observados, o que corrobora o valor do EQM.

Já para a descarga sólida, tem-se o COE indicando que o modelo não se ajusta à realidade expressa pelos dados monitorados, seguido pelo PBIAS que ilustra a superestimação dos mesmos em escalas consideráveis, e o EQM confirmando que o modelo não prediz o que é observado.

Mesmo Garbossa *et al.* (2011) afirmando que uma questão a ser discutida é como se obter dados em quantidade e qualidade suficientes para a realização de estudos, sendo este, provavelmente, o maior obstáculo encontrado no Brasil, não pode-se afirmar que a coleta/qualidade dos dados coletados foi responsável pelo mal desempenho do modelo em relação à bacia hidrográfica do Rio Santa Maria da Vitória.

Machado e Vetorazzi (2003) afirmam que, após calibrado o modelo, teve boa estimativa com relação aos dados observados em Ribeirão Marins – SP. O

COE encontrado após a calibração foi de 0,83, o que indica que o modelo é melhor preditor que a média de dados medidos para a bacia e simulação em questão.

Já Andriolo *et al.* (2008) relatam que o modelo SWAT apresentou viabilidade de aplicação em condições brasileiras, desde que calibrado. Com a calibração, o modelo apresentou boa capacidade de reproduzir as condições de produção de sedimentos da bacia estudada. A diferença entre a vazão sólida observada e a modulada foi de 2,65%.

De acordo com Krause, Boyle e Bäse (2005), algumas são as razões para se avaliar o desempenho de um modelo, como conhecer a sua capacidade de reproduzir um comportamento histórico e futuro da bacia; subsidiar melhorias para o ajuste de parâmetros; comparar esforços atuais de modelagem com os resultados de estudos anteriores. Logo, enfatizamos a importância da calibração do modelo para a área estudada e análise do resultado obtido após a calibração.

## 5.2. MODELAGEM COM O SWAT CALIBRADO

Seguindo as orientações de Neitsch *et al.* (2005), iniciou-se o processo de calibração com médias anuais e poucas interações.

Os parâmetros utilizados foram aqueles descritos no Capítulo 4 - Metodologia, que são BLAI, ESCO, SOL\_AWC, CANMX, CN2, USLE\_P, ALPHA\_BF, CH\_K2 e SPCON.

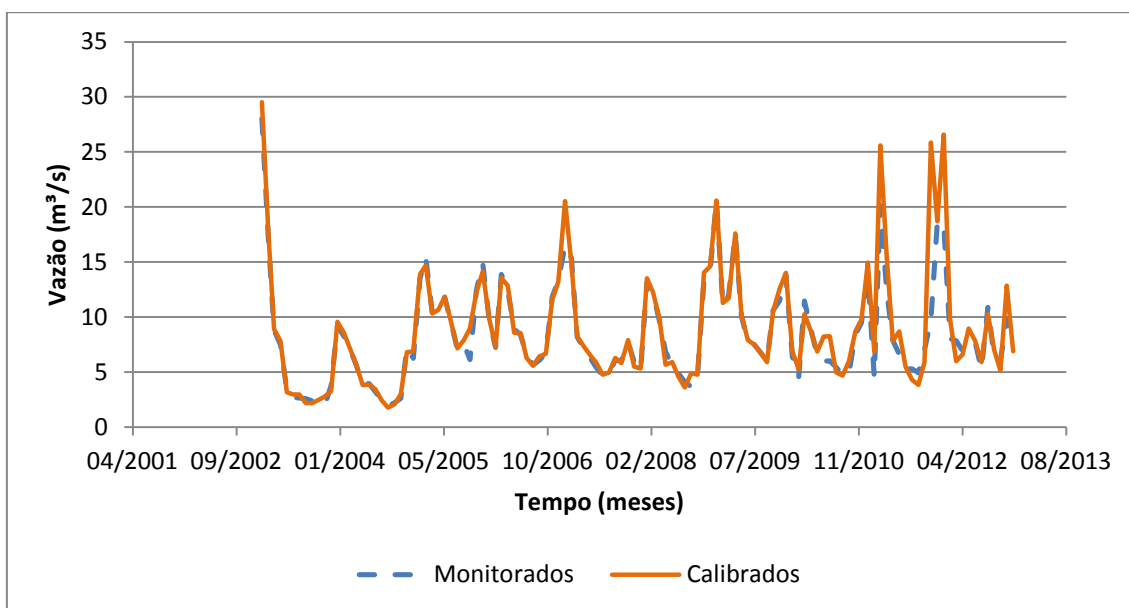
Para cinco interações, o SWAT-CUP afirmou que não é possível realizar tal calibração. Mesmo sabendo deste possível resultado, foi necessário iniciar por ele, para que a técnica de calibração escolhida (SUFI2) já iniciasse o processo de refinamento da calibração. Após este passo, foi realizada a calibração para

as médias mensais, agora com 10 interações. A conclusão obtida também foi que não seria possível tal calibração.

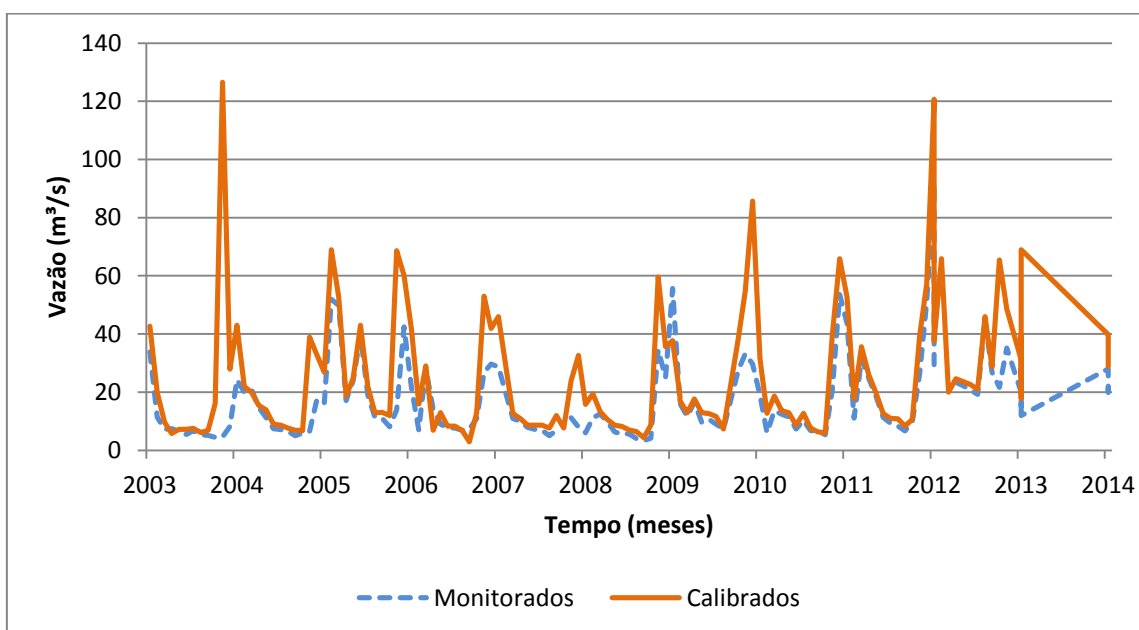
Iniciou-se assim a segunda etapa da calibração, agora com mais parâmetros. São eles o BLAI, ESCO, SOL\_AWC, CANMX, CN2, SOLK, GWQMN, CH\_K2, SOL\_Z, GW\_REWAP, ALFHA\_BF, USLE\_P, SPCON, CH\_N2, SURLAG e EPCO. Seguindo a mesma idéia da primeira etapa, o modelo começou a ser calibrado para cinco interações. O resultado obtido foi positivo, mas para aumentar o refinamento do mesmo, o mesmo foi calibrado agora com 330 interações (a mesma quantidade que o SWAT apresentou como necessário para realizar a análise de sensibilidade). Os valores dos 16 parâmetros, após a calibração, podem ser observados na Tabela 5.

<b>Tabela 6. Parâmetros de Calibração para o Modelo</b>	
<b><i>Parâmetro</i></b>	<b><i>Valor Calibrado</i></b>
<i>ESCO</i>	<i>0,68</i>
<i>SOL_AWC</i>	<i>0,57</i>
<i>BLAI</i>	<i>0,43</i>
<i>CANMX</i>	<i>26,58</i>
<i>CN2</i>	<i>47</i>
<i>SOLK</i>	<i>32</i>
<i>GWQMN</i>	<i>3659</i>
<i>CH_K2</i>	<i>102,08</i>
<i>SOL_Z</i>	<i>860</i>
<i>GW_REWAP</i>	<i>0,19</i>
<i>ALPHA_BF</i>	<i>0,048</i>
<i>USLE_P</i>	<i>0,645</i>
<i>SPCON</i>	<i>0,0056</i>
<i>CH_N2</i>	<i>0,27</i>
<i>SURLAG</i>	<i>8,67</i>
<i>EPCON</i>	<i>0,51</i>

Alterando os parâmetros no SWAT, os parâmetros de entrada foram novamente simulados, e os dados calibrados podem ser observados no Gráfico 11 e 12.



**Gráfico 11. Vazão calibrada e monitorada para a sub-bacia 11 da Bacia Truncada do Rio Santa Maria da Vitória – a montante dos reservatórios.**

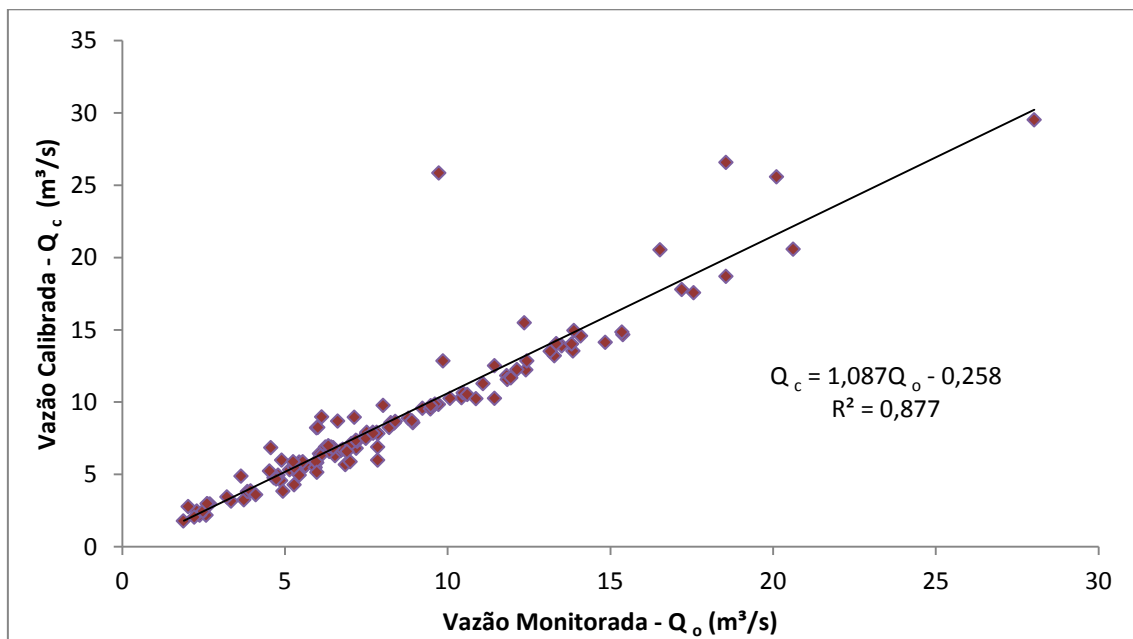


**Gráfico 12. Vazão calibrada e monitorada para a sub-bacia 52 da Bacia Truncada do Rio Santa Maria da Vitória – a jusante dos reservatórios.**

Para a sub-bacia 11 os valores de vazão continuam seguindo a tendência dos monitorados, distanciando-se apenas nos picos de março/2011, dezembro/2011 e fevereiro/2012, todos em período chuvoso. Já para a sub-

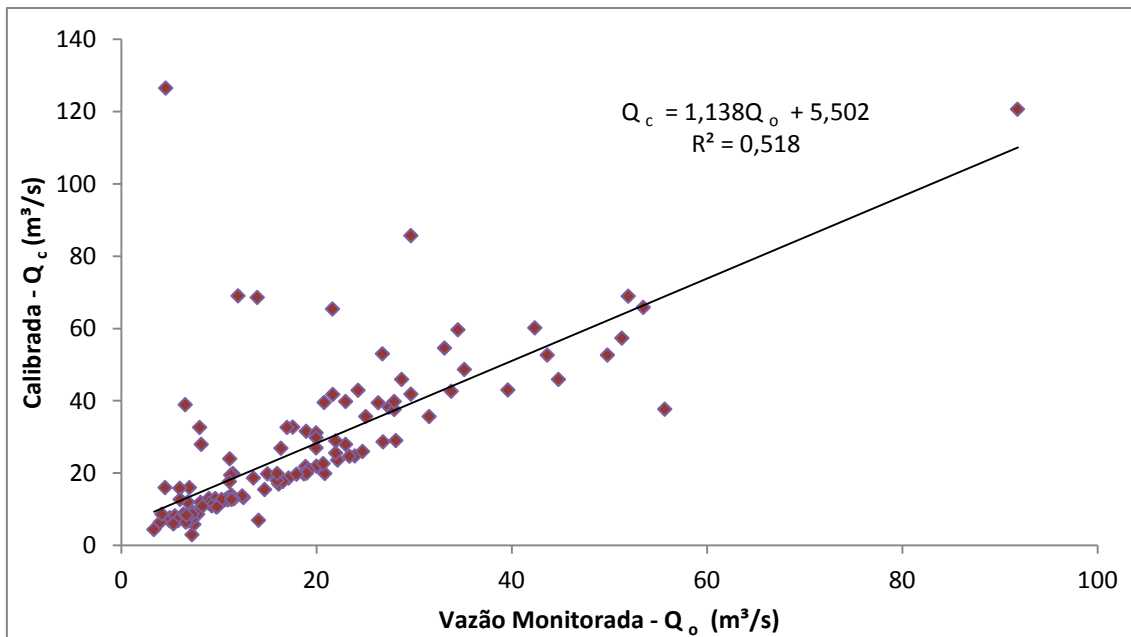
bacia 52 os valores calibrados passaram a seguir a tendência dos modelados, embora ainda superestimados para o período chuvoso observado.

A fim de avaliar o coeficiente de determinação foram elaborados os Gráficos 13 e 14.



**Gráfico 13. Correlação entre vazão calibrada e monitorada para a sub-bacia 11 da Bacia Truncada do Rio Santa Maria da Vitória – a montante dos reservatórios.**

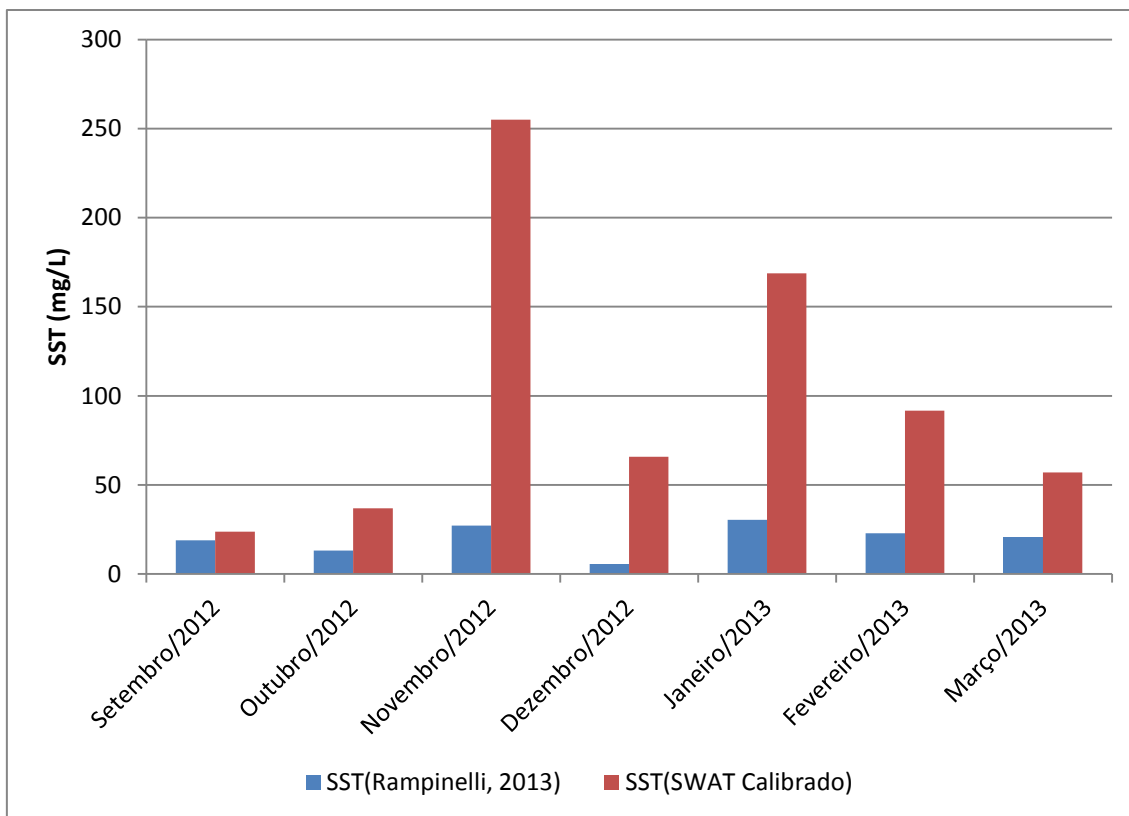




**Gráfico 14. Correlação entre vazão calibrada e monitorada para a sub-bacia 52 da Bacia Truncada do Rio Santa Maria da Vitória – a jusante dos reservatórios.**

Nos gráficos supracitados, pode-se observar que os coeficientes analisados tiveram melhora significativa após a calibração, a sub-bacia 11 apresentou um coeficiente de 0,87 enquanto para a sub-bacia 52 o coeficiente encontrado foi de 0,51. Observando apenas os coeficientes de determinação, pode-se afirmar que a calibração foi positiva para o modelo estudado. Entretanto, deve ser ressaltado que para a sub-bacia 52 a calibração feita não conseguiu simular de modo satisfatório a produção de água, se comparada com os dados monitorados.

No que se refere a sedimentos suspensos, pode-se observar no Gráfico 15 a relação entre os valores apresentados pelo SWAT após calibração e aqueles monitorados por Rampinelli (2012).



**Gráfico 15. Concentração de Sólidos Suspensos Totais Monitorados (Rampinelli, 2013) e Modelados.**

Os resultados obtidos após a calibração do SWAT superestimou os valores monitorados por Rampinelli (2013), principalmente nos meses mais chuvosos, como podemos observar para novembro/2012 e janeiro/2013.

Nas Tabelas 6 e 7, observar-se os coeficientes estatísticos para as sub-bacias estudadas após a calibração do modelo.

**Tabela 7. Análises Estatísticas para o Modelo Simulado – Sub-bacia 11**

	COE	PBIAS	EQM
Vazão	0,83	-4,45	3,25

**Tabela 8. Análises Estatísticas para o Modelo Simulado – Sub-bacia 52**

	COE	PBIAS	EQM
Vazão	-0,56	-30,34	280
Descarga Sólida	-0,92	-56,95	78009

De acordo com os coeficientes estatísticos apresentados, tem-se que para a sub-bacia 11 há uma boa correlação entre a vazão apresentada pelo modelo calibrado e aquela monitorada, indicando este como bom preditor de produção de água para esta sub-bacia. O PBIAS negativo reforça a superestimação de valores (o que observamos nos picos), e o EQM (embora ainda não seja zero) corrobora com a utilização do modelo como preditor de vazão.

Para a sub-bacia 52 tem-se que o COE melhorou em relação à modelagem não calibrada, embora ainda indique que as médias dos valores observados são melhores para prever a situação do que a modelagem calibrada, tanto para vazão quanto para descarga sólida. O PBIAS indica a superestimação do modelo em relação aos dados monitorados, e o EQM reafirma que o modelo calibrado não funciona bem para a sub-bacia em questão.

Marchioro *et al.* (2011) utilizaram o SWAT para analisar a distribuição espacial da produção de sedimentos na bacia do córrego do Santa Maria (Baixada Fluminense). Eles encontraram discrepância de 57,2 mg/L entre os valores monitorados em campo e os simulados após a calibração do modelo SWAT, e atribuem tal diferença a possíveis defeitos do sistema de monitoramento e pela utilização do local como área de lazer (devido ao represamento da água), promovendo a movimentação dos sedimentos de fundo do canal, e contribuindo para superestimar os dados medidos no período seco.

Já FUKUNAGA (2012) relata que a alta frequência de falhas no monitoramento prejudicou a calibração do modelo, que também não representou satisfatoriamente os dados monitorados.

LESSA (2011) classifica como ótimo o ajuste obtido após a calibração do SWAT para a bacia estudada, para as simulações referentes à produção de água. Entretanto, para a descarga sólida, não obteve correlação direta com precipitação.

Na bacia do São Bartolomeu, em Viçosa (MG), Lelis *et al.* (2012) realizaram análise de sensibilidade e calibração do SWAT para simulações de vazão e produção de sedimentos, tendo como base a comparação de resultados produzidos por 10 parcelas de 40 m<sup>2</sup>. Segundo eles, a sensibilidade dos parâmetros variou para cada sub-bacia, de acordo com seu uso e ocupação. Os parâmetros mais sensíveis do modelo foram aqueles relacionados às propriedades físicas do solo e ao manejo.

## 6. CONCLUSÃO

De acordo com os resultados obtidos no presente trabalho pode-se concluir:

No tocante a produção de água, para montante dos reservatórios, o SWAT apresentou bons resultados, sendo possível o seu uso neste caso, após a calibração deste ( $COE = 0,83$ ). Já a jusante dos reservatórios, os resultados modelados não foram tão satisfatórios ( $COE = -0,56$ ). Tais valores são devidos à falta de dados detalhados da operação dos reservatórios.

O resultado da modelagem com o SWAT para a produção de sedimentos segue a mesma tendência que os valores monitorados, tanto a jusante quanto a montante, destacando que a concentração de sólidos suspensos é subestimada pelo programa, enquanto que a produção de sedimentos é superestimada. Entretanto, calibrado apenas com as campanhas disponíveis não pode ser tido como um bom modelo para prever quantitativamente a produção de sedimentos para o caso estudado.

O modelo confirmou que o uso do solo interfere diretamente na produção de sedimentos nas sub-bacias estudadas. Bacias com alto percentual de pastagem foram as maiores produtoras de sedimentos, em contrapartida com bacias onde a maior parte de sua área é ocupada com florestas. A diferença entre estes usos do solo chega a ser 42 vezes maior para áreas com alta declividade e pastagem em relação a áreas com florestas.

## **7. RECOMENDAÇÕES**

Com o objetivo de estudar uma forma para que o SWAT seja um bom preditor de vazão e sedimentos para a Bacia do Rio Santa Maria da Vitória, segue algumas recomendações para trabalhos futuros:

- Inserir no banco de dados do programa dados de mais de uma estação climatológica;
- Dividir a área de estudo em três partes, de acordo com as características topográficas da mesma: Alto Santa Maria, Médio Santa Maria e Baixo Santa Maria e simular separadamente cada área;
- Calibrar os resultados simulados com mais parâmetros;
- Monitorar Sólidos Suspensos Totais a montante dos reservatórios para averiguar se o modelo é um bom preditor em relação à produção de sedimentos para a parte não avaliada.

## 8. REFERÊNCIAS

ABBASPOUR, K. C. **SWAT-CUP2012: SWAT Calibration and Uncertainty Programs – A User Manual**. Departamento f Systems Analysis, Integrated Assessment and Modelling (SIAM), Eawag, Swiss Federal Institute of Aquatic Science and Technology, Duebendorf, Switzerland, 2014.

ADRIOLO M. V.; SANTOS, I.; GIBERTONI, R. C.; CAMARGO, A. S. G. **Calibração do modelo SWAT para a produção e transporte de sedimentos**. In: VI Simpósio Brasileiro sobre Pequenas e Médias Centrais Hidrelétricas. T25, A03. Belo Horizonte, 2008.

ANA - AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. **Hidroweb**. 2005. Disponível em: <<http://hidroweb.ana.gov.br/HidroWeb.asp?TocItem=1080&TipoReg=7&MostraCon=false&CriaArq=false&TipoArq=1&SerieHist=true>>. Acessado em 25 de maio de 2014.

ANANDA, J.; HERATH, G. **Soil erosion in developing countries: a socio-economic appraisal**. Journal of Environmental Management, v. 68, n. 4,. 2003.

ARNOLD, J. G., MORIASI, D. N., GASSMAN, P. W., ABBASPOUR, K. C., WHITE, J. M., SRINIVASAN, R., SANTHI, C., HARMEL, R. D., VAN GRIESVEN, A., VAN LIEW, M. W., KANNAN, N., KA, M., K. **SWAT: Model Use, Calibration and Validation**. American Society of Agricultural and Biological Engineers v.55 (4): 1491-1508, 2012.

ARDOLD, J. G., MUTTIAH, R. S., SRIVASAN, R., ALLEN, P. M. **Regional Estimation of base flow and groundwater recharge in Upper Mississippi river basin**. Journal of Hidrology, v.227, 2000.

BALDISSERA, G. C. **Aplicabilidade do modelo de simulação hidrológica SWAT (Soil and Water Assessment Tool), para a bacia hidrográfica do Rio Cuiabá/MT**. Dissertação Mestrado. Instituto de Ciências Exatas e da Terra, Universidade Federal do Mato Grosso, Cuiabá, MT, 2005.

BENAMAN, J.; SHOEMAKER, C. A.; HAITH, D. A. **Calibration and validation of soil and water assessment tool on an agricultural watershed in upstate New York**. Journal of Hydrologic Engineering. V. 10, n. 10, p. 363-374, 2005.

BERTONI, J. e LOMBARDI NETO, F. **Conservação do Solo**. 7 ed. São Paulo: Ícone, 2010.

BONUMA, N. B. **Modelagem do Escoamento da Produção de Sedimentos e da Transferência de Fósforo em Bacia Rural do Sul do Brasil**. Tese de Doutorado da Universidade Federal de Santa Maria, 2011.

BORDAS, M. P. e SEMMELMANN, F. R. **Elementos de Engenharia de Sedimentos**. In: TUCCI, C. E. M. (org). Hidrologia e Aplicação. Porto Alegre. Ed, da UFRGS, EDUSF, ABRH, 1997.

CAIADO, M. A. C. **Modeling fate and transport of nitrogen and phosphorus in crop fields under tropical conditions**. Tese ( Doutorado em Biological Systems Engineering), Universidade Politécnica da Virgínia, Virginia, 2005.

CARVALHO, N. O. **Hidrossedimentologia prática**. 2º ed. Rio de Janeiro: Interciência, 2008.

CARVALHO, D. F., CRUE, E. S., PINTO, M. F., SIDA, L. D. B, GUERRA, J. G. M. **Características da chuva e perdas por erosão sob diferentes práticas**



**de manejo de solo.** Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v. 13, n.1., 2009.

CARVALHO, N. O.; FILIZOLA JR., N. P.; SANTOS, P. M. C.; LIMA, J. E. F. W. **Guia de Práticas Sedimentométricas.** 154 p. ANEEL, 2000. Disponível em: [http://www.aneel.gov.br/biblioteca/downloads/livros/Guia\\_prat\\_port.pdf](http://www.aneel.gov.br/biblioteca/downloads/livros/Guia_prat_port.pdf). Acesso em: 14 dez. 2012.

CHAPLOT, V.; SALEH, A.; JAYNES, D. B.; ARNOLD, J. G. **Predicting water, sediment and NO<sub>3</sub>-N loads under scenarios of land-use and managmente practices in a flat watershed.** Water, Air and Soil Poluition, Dordrectl, v.154, n1/4, 2004.

COCHANE, T. A. e FLANAGAN, D. C. **Assessing water erosion in small watershed using WEPP with GIS and digital elevation models.** Soil Water Conser., 54, 1999.

CÔMITE DO SANTA MARIA DA E JUCU – CSMJ. **Plano Diretor das Bacias dos rios Santa Maria da Vitória e Jucu.** Vitória, Consórcio Intermunicipal para a Recuperação das Bacias dos rios Santa Maria da Vitória e Jucu, 1995.

CÔMITE DO SANTA MARIA DA E JUCU – CSMJ. **Enquadramento dos Corpos de Água em Classes e Plano de Bacia para os rios Santa Maria da Vitória e Jucu: Diagnóstico das demandas hídricas para a Região Hidrográfica do rio Santa Maria da Vitória.** Disponível em <http://jucusantamaria.com.br/arquivos/download-info/oficina-diagnostico-santa-maria/>. Acessado em 7 de julho de 2014.

EMBRAPA-SNLCS. **Levantamento de reconhecimento dos solos do Estado do Espírito Santo.** Escala 1:400.000. 1987.

ENERGIAS DO BRASIL. **Usinas do Espírito Santo**. Disponível em <http://www.escelsa.com.br/aescelsa/usinas.asp>. Acessado em 02 de Fevereiro de 2013.

FERRIGO, S., MINOTTI, R., ROIG, H., E KOIDE, S. **Análise do Modelo Swat na Simulação da Produção de Sedimentos quando Calibrado Unicamente para Vazão em uma Pequena Bacia Hidrográfica**. X Encontro Nacional de Engenharia de Sedimentos, Foz do Iguaçu – PR, 2012.

FEYEREISEN, G. W.; STRICKLAND, T. C.; BOSCH, D. D.; SULLIVAN, D. **G.Evaluation of SWAT manual calibration and input parameter sensitivity in the Little River watershed**. Transactions of the American Society of Agricultural and Biological Engineers, v. 50, n. 3, p. 843–855. 2007.

FUKUNAGA, D. C. **Estimação de Vazão em Bacias Hidrográficas do Sul do Espírito Santo usando o SWAT**. Dissertação de Mestrado. Centro de Ciências Agrárias da Universidade Federal do Espírito Santo, Jerônimo Monteiro, 2012.

GALHARTE, C. A. **Estimativa do Escorrimento Superficial e da Produção de Sedimentos em Áreas de Atividade Agropastoris, no Estado de São Paulo, em função de Uso e Cobertura de Solo** (Tese de Doutorado), Universidade de São Paulo, São Carlos, 2011.

GARCIA, G. E. e GNÇALVES, J. E. **Implementação de Modelo Numérico para Avaliação do Transporte de Sedimentos no Reservatório de Itaipu – PR**. Revista Brasileira de Recursos Hídricos. V.16, n.3, 2011.

GARBOSSA L.H.P.; VASCONCELLOS, C.R.C., LAPA, K.R., BLAINSKI, E., PINHEIRO, A. **The use and results of the Soil and Water Assessment Tool in Brazil: A review from 1999 until 2010.** International SWAT Conference & Workshops, Toledo – Espanha, 2011.

GEOBASES – **Sistema Integrado de Bases Geoespaciais do Estado do Espírito Santo.** Disponível em: <http://www.geobases.es.gov.br/publico/AcessoNavegador>. Acessado em 27 de Janeiro de 2013.

GUERRA, A. J. T. **O início do processo erosivo.** In: GUERRA, A. J. T; SILVA, A. S.; BOTELHO, R. G. M. Erosão e Conservação dos Solos: conceitos, temas e aplicações. 3ª ed. Rio de Janeiro, Ed. Bertandi, 2009.

GUPTA, H. V.; SOROOSHIAN, S.; YAPO, P. O. **Status of automatic calibration for hydrologic models: comparison with multilevel expert calibration.** Journal of Hydrologic Engineering, Reston, v. 4, n.2.

HIEPE, C. **Soil Degradation by Water Erosion in a Sub-humid West-African catchment: a modelong approach considering land use and climate change in Benin.** Tese de Doutorado. Univerität Bonn, Mathematisch-Naturwissenschaftliche Fakultät, Bonn, Germany, 2008.

KANNAN, N.; WHITE, S. M.; WORRALL, F.; WHELAN, M. J. **Sensitivity analysis and identification of the best evapotranspiration and runoff options for hydrological modeling in SWAT-2000.** Journal of Hydrology, v. 332, p. 456-466. 2007.

KRAUSE, P.; BOYLE, D. P.; BÄSE, F. **Comparison of different efficiency criteria for hydrological model assessment**, Adv. Geosci., n 5, p. 89-97. 2005.

KUWAJIMA, J. I. **Análise do Modelo SWAT como ferramenta de prevenção e estimativa de assoreamento no Reservatório do Lobo (Itiripa/Brotas-SP)**. Dissertação de Mestrado – Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo. São Carlos, 2012.

LANZA, D. **Diagnóstico da Erosão Laminar na alta e média bacia do rio Paraopeba**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2011.

LELIS, T. **Modelagem do escoamento superficial e perda de solo na bacia ribeirão São Bartolomeu, Zona da Mata de Minas Gerais, utilizando o simulador SWAT**. Tese de Doutorado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Viçosa, 2011.

LELIS, T. A.; CALIJURI, M. L.; SANTIAGO, A. F.; LIMA, D. C.; ROCHA, E. O. **Análise de sensibilidade e calibração do modelo SWAT aplicado em bacia hidrográfica da região sudeste do Brasil**. Rev. Bras. Ciênc. Solo, Viçosa, v. 36, n. 2, 2012.

LESSA, L. G. F. **Simulação da Produção de Sedimentos na Bacia Hidrográfica do rio Pardo – Botucatu – SP, por Modelagem Hidrológica**. Universidade Estadual de São Paulo, Botucatu, 2011.

LIMA, J. E. F. W e LOPES, W. T. A (Organização). **Engenharia de Sedimentos: na Busca de Soluções para Problemas de Erosão e**

**Assoreamento.** Associação Brasileira de Recursos Hídricos (ABRH). Brasília, 2011.

MACEDO , F. L. de, MÉLLO JÚNIOR, A. V., MARCELINI, S. S., PEDROTTI, A. **Modelagem da Produção de Sedimentos na Sub-bacia Hidrográfica do riacho Jacaré-SE.** Raega 24, 2012.

MACHADO, R. E. **Simulação do Escoamento e de Produção de sedimentos em uma microbacia hidrográfica utilizando técnicas de modelagem e geoprocessamento.** Tese de Doutorado. Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz – Universidade de São Paulo. Piracicaba, 2002.

MACHADO, R. E. E VETTORAZZI, C. A. **Simulação da Produção de Sedimentos para a Microbacia Hidrográfica do Ribeirão dos Marins (SP).** Ver, Bras. Ci. Solo 27: 735-741, 2003.

MARCHIORO, E.; FERNANDES, N. F.; MACEDO, J. R.; BHERING, S. B.; GONÇALVES, A. O.; CAIADO, M. A. C. **Modelagem da produção de sedimentos no noroeste fluminense como subsídio ao planejamento ambiental: um estudo de caso da bacia do Córrego Santa Maria.** Revista Brasileira de Geomorfologia, v. 12, n. 1, 2011.

MEDEIROS, P. R. P., KNOPPERS, B., SOUZA, W. F. L, OLIVEIRA, E. N.; **Aporte de Material em suspensão no bairro São Francisco (SE/AL) em diferentes condições hidrológicas.** Brazillian Journal Science Technology, v. 15, n.1, 2011.

MERCURI, E. G. F.; DEPPE, F.; LOHMANN, M. e SIMÕES, K. **Metodologia de Geração de Dados de Entrada e Aplicação do Modelo SWAT para Bacias**

**Hidrográficas Brasileiras.** Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto – Anais XIV, Natal – RN, Brasil, 25-30 de Abril de 2009, INPE.

MINELLA, J. P. G. **Identificação de Fontes de Produção de Sedimentos em uma Pequena Bacia Rural.** Dissertação de Mestrado. Instituto de Pesquisas Hidráulicas da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2003.

MINELLA, J. P. G.; MERTEN, G. H.; REICHERT, J. M.; SANTOS, D. R.; **Identificação e Implicações para a Conservação do Solo das Fontes de Sedimentos em Bacias Hidrográficas.** Ver. Bras. Cie. Do Solo, v.31, 2007.

MINELLA, J. P. G.; MERTEN, G. H.; MAGNAGO, P. **Análise qualitativa e quantitativa de histerese entre vazão e concentração de sedimentos durante eventos hidrológicos.** Rev. Bras. Eng. Agri. Ambiental, v.15, n.12, 2011.

MINGOTI, R. **Produção de Sedimentos em Microbacias Hidrográficas em Função do Relevo e da Cobertura Florestal.** Escola Superior de Agricultura ‘Luiz de Queiroz’. Piracicaba, 2009.

MONTEIRO, R. C. **Estimativa do Espaço Temporal da Superfície Potenciométrica do sistema aquífero Guarani na Cidade de Ribeirão Preto (SP), Brasil.** Tese de Doutorado. Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 2003.

MORGAN, R. P. C. **Soil erosion and conservation.** 3. Ed. Padstow: Blackwell Publishing, 2005.

MORIASI, D. N.; ARNOLD, J. G.; VAN LIEW, M. W.; BINGNER, R. L.; HARMEL, R. D.; VEITH, T. L. **Model evaluation guidelines for systematic**

**quantification of accuracy in watershed simulations.** Transactions of the ASABE - American Society of Agricultural and Biological Engineers. n. 3, v. 50, 885-900p. 2007.

MORIASI, D. N.; WILSON, B. N.; DOUGLAS-MANKIN, K. R.; ARNOLD, J. G. e GOWDA, P. H. **Hidrologic and Water Quality Models: Use, Calibration and Validations.** ASABE – American Society of Agricultural and Biological Engineers. V. 55. N. 4, 2012.

MORO, M. A **Utilização da Interface SWAT-GIS no estudo da produção de Sedimentos e do volume de escoamento superficial com simulação de cenários alternativos.** Dissertação de Mestrado. Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz da Universidade de São Paulo. Piracicaba, 2005.

NASH, J. E.; SUTCLIFFE, J. V. **River flow forecasting through conceptual models Part I: A discussion of principles.** Journal of Hydrology. n. 3, v. 10, 282-290p. 1970.

NEITSCH, S. L.; ARNOLD, J. G.; KINIRY, J. R.; WILLIAMS, J.R.; KING, K. W. **Soil and Water Assessment Tool: Theoretical Documentation Version 2005.** Temple, GSWRL, 2005.

OLIVEIRA, R. M. S. **Distribuição dos Sedimentos em Trechos do rio Santa Maria da Vitória – ES.** Programa de Pós Graduação em Engenharia Ambiental da Universidade Federal do Espírito Santo, 2003.

PATERNIANI, E. **Agricultura sustentável nos trópicos.** Estud. Av., 15 (43), 2001.

PONTES, S. H. N.; FERNANDES, I. V. **Atualização do método das isonas para a região Amazônica.** In: Encontro de Iniciação Científica e Pós-Graduação do ITA, 8., São José dos Campos, Anais, 2002.

PORTO, M. F. A.; PORTO, R. L. **Gestão de bacias hidrográficas.** Estud. av., São Paulo, v. 22, n. 63, 2008.

RAMPINELLI, F. G. **Correlação de sedimentos e eventos chuvosos em um trecho do rio Santa Maria da Vitória – ES.** Dissertação de Mestrado. Programa de Pós Graduação em Engenharia Ambiental da Universidade Federal do Espírito Santo, 2013.

SANTOS, I. *et al.* **Hidrometria Aplicada.** Curitiba: LATEC, 2001.

SANGOI, R. G. **Avaliação da produção de sedimentos em eventos chuvosos na bacia hidrográfica experimental de São Martinho da Serra-RS.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2007.

SCAPIN, Juliana. **Caracterização do transporte de Sedimentos em um pequeno rio urbano na Cidade de Santa Maria – RS.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2008

SCHULTZ, G. B., SIEFERT, C. A. C. e SANTOS, I. dos. **Avaliação do ArcMusle para a Estimativa da Produção de Sedimentos na Bacia Hidrográfica do Alto Rio Negro, Região Sul Brasileira.** Bol. Geogr., Maringá, v.31, n.2, 2013.



SENHORELO, A. P. **Interrelações entre bacias hidrográficas com diferenciados Solos, Características Físicas, Uso/Ocupação da Terra e Perda de Solos por Erosão Laminar e Aporte de Sedimentos.** Programa de Pós Graduação em Engenharia Ambiental da Universidade Federal do Espírito Santo, 2000.

SILVA, F. G. B. e CRESTANA, S. **Modelos e formulações para análises de erosão de solos em bacias hidrográficas voltadas ao planejamento ambiental: revisão e aplicações preliminares.** São Carlos: Rima, 2004.

SRINIVASAN, R. e ARNOLD, J.G. **Integration of a basin-scale water quality model with GIS.** Water Res. B. 30, 1994.

TUCCI, C. E. M. **Hidrologia: ciência e aplicação.** 2. Ed. Porto Alegre: Ed. da UFRGS: ABRH, 2000.

UZEIKA, T. **Aplicabilidade do Modelo SWAT na Simulação da Produção de Sedimentos em uma Pequena Bacia Hidrográfica Rural.** Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2009.

VAN GRIENSVEN, A. e MEIXENER, T. **Methods to Quantify and Identify the Sources of Uncertainty for River Basins Water Quality Models.** Water Resources. v.39. n. 12. 2006.

VESTENA, R. L. **Análise da relação entre a dinâmica de áreas saturadas e o transporte de sedimentos em uma bacia hidrográfica por meio de monitoramento e modelagem.** Tese (Doutorado em Engenharia Ambiental) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis. 2008.

VON SPERLING, M. **Estudos e Modelagem da qualidade da água de Rios.** Belo Horizonte: DESA – UFMG, 2007.

WALLING, D. E., HE, Q E WHELAN P. A. **Using C<sub>s</sub>137 measurements to validate the application of the AGNPS and ANSWERS erosion and sediment yield models in two small Devon catchments.** Soil Till. Res. 69: 27-43, 2003.

ZHANG, X.; SRINIVASAN, R; ZHAO, K.; LIEW, V. M. **Evaluation of global optimization algorithms for parameter calibration of a computationally intensive hydrologic model.** Hydrol. Process. v. 23, n. 3, p. 430–441, 2009.